

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Universitaria de

Ingeniería Técnica de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE GRADO

DESARROLLO DE CIRCUITOS DE ALTA FRECUENCIA
PARA LTE

KHALID BENBOUCHTA

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

Julio 2013

DESARROLLO DE CIRCUITOS DE ALTA FRECUENCIA PARA LTE

KHALID BENBOUCHTA



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur
POLITÉCNICA

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: DESARROLLO DE CIRCUITOS DE ALTA FRECUENCIA PARA LTE

AUTOR: Khalid Benbouchta

TUTOR: Cesar Briso Rodríguez

DEPARTAMENTO: Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Raúl Fernández Recio

TUTOR: Cesar Briso Rodríguez

SECRETARIO: Rafael Herradón Díez

Fecha de lectura: **de** Julio **del** 2013

Calificación:

El Secretario



Resumen

En este proyecto realizaremos un estudio del efecto de las interferencias procedentes de las redes públicas y veremos cómo afectan el rendimiento de las comunicaciones GSM-R que están en la banda de frecuencias adyacente, por un lado, definiremos las características de las redes públicas y como afectan los niveles de potencia y los anchos de banda de redes de banda ancha, especialmente LTE que dispone de un ancho de banda adaptativo que puede llegar hasta 20 MHz, y por otro lado definiremos las características y las exigencias de las comunicaciones GSM-R que es una red privada que se utiliza actualmente para comunicaciones ferroviarias.

Con el objetivo de determinar el origen y los motivos de estas interferencias vamos a explicar cómo se produzcan las emisiones no deseadas de las redes públicas que son fruto de la intermodulación que se produzca por las características no lineales de los amplificadores, entre las emisiones no deseadas se puede diferenciar entre el dominio de los espurios y el dominio de las emisiones fuera de banda, para determinar el nivel de las emisiones fuera de banda definiremos la relación de fugas del canal adyacente, ACLR, que determina la diferencia entre el pico de la señal deseada y el nivel de señal interferente en la banda de paso.

Veremos cómo afectan estas emisiones no deseadas a las comunicaciones GSM-R en el caso de interferencias procedentes de señales de banda estrecha, como es el caso de GSM, y como afectan en el caso de emisiones de banda ancha con los protocolos UMTS y LTE, también estudiaremos como varia el rendimiento de la comunicación GSM-R frente a señales LTE de diferentes anchos de banda.

Para reducir el impacto de las interferencias sobre los receptores GSM-R, analizaremos el efecto de los filtros de entrada de los receptores GSM-R y veremos cómo varia la BER y la ACLR.

Además, con el objetivo de evaluar el rendimiento del receptor GSM-R ante diferentes tipos de interferencias, simularemos dos escenarios donde la red GSM-R se verá afectada por las interferencias procedente de una estación base de red pública, en el primer escenario la distancia entre la BS y MS GSM-R será de 4.6 KM, mientras en el segundo escenario simularemos una situación típica cuando un tren está a una distancia corta (25 m) de la BS de red pública.

Finalmente presentaremos los resultados en forma de graficas de BER y ACLR, y tablas indicando los diferentes niveles de interferencias y la diferencia entre la potencia a la que obtenemos un valor óptimo de BER, 10^{-3} , sin interferencia y la potencia a la que obtenemos el mismo valor con interferencias.



Abstract

In this project we will study the interference effect from public networks and how they affect the performance of GSM-R communications that are in the adjacent frequency band, furthermore, we will define the characteristics of public networks and will explain how the power levels and bandwidth broadband networks are affected as a result, especially LTE with adaptive bandwidth that can reach 20 MHz. Lastly, we will define the characteristics and requirements of the GSM-R communications, a private network that is currently used for railways communications.

In order to determine the origin and motives of these interferences, we will explain what causes unwanted emissions of public networks that occur as a result. The intermodulation, which is caused by the nonlinear characteristics of amplifiers. Unwanted emissions from the transmitter are divided into OOB (out-of-band) emission and spurious emissions. The OOB emissions are defined by an Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR) requirement.

We'll analyze the effect of the OOB emission on the GSM-R communication in the case of interference from narrowband signals such as GSM, and how they affect emissions in the case of broadband such as UMTS and LTE; also we will study how performance varies with GSM-R versus LTE signals of different bandwidths.

To reduce the impact of interference on the GSM-R receiver, we analyze the effect of input filters GSM-R receivers to see how it affects the BER (Bits Error Rate) and ACLR.

To analyze the GSM-R receiver performance in this project, we will simulate two scenarios when the GSM-R will be affected by interference from a base station (BS). In the first case the distance between the public network BS and MS GSM-R is 4.6 KM, while the second case simulates a typical situation when a train is within a short distance, 25 m, of a public network BS.

Finally, we will present the results as BER and ACLR graphs, and tables showing different levels of interference and the differences between the power to obtain an optimal value of BER, 10^{-3} , without interference, and the power that gets the same value with interference.



ÍNDICE

Resumen	i
Abstract.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Situación actual y bandas de frecuencia	5
1.2 Emisiones no deseadas.....	7
1.3 Relación de fugas del canal adyacente ACLR.....	9
1.4 Intermodulación	12
2 ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS.....	19
2.1 Efecto de las interferencias en los enlaces ascendente y descendente	19
2.1.1 Enlace descendente GSM-R.....	20
2.1.2 Enlace ascendente GSM-R.....	21
2.1.3 Enlaces ascendentes GSM-R y LTE.....	22
2.1.4 Enlaces descendentes GSM-R y LTE	22
2.1.5 Interferencias en la banda extendida E-GSM-R.....	24
2.1.6 Interferencias de banda estrecha y banda ancha	26
2.2 Características de los transmisores y receptores	27
2.3 Técnicas para reducir el impacto de las interferencias	28
2.4 Medidas de interferencias.....	30
2.5 Conclusión	32
3 SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS	37
3.1 Descripción del circuito simulado	40
3.2 Efecto del nivel de potencia	45
3.2.1 Variación de potencia sin filtro de entrada del receptor	45
3.2.2 Variación de potencia con filtro de entrada del receptor	49
3.3 Variación de la separación entre portadoras y el ancho de banda.....	51
3.3.1 Variación del canal.....	51
3.3.2 Variación del ancho de banda	53
3.3.2.1 Ancho de Banda de 10 MHZ	53
3.3.2.2 Ancho de banda de 20 MHZ	56



3.4	Efecto de las interferencias de varias portadoras	58
3.4.1	Interferencias por dos portadoras	58
3.4.2	Efecto de las interferencias de banda estrecha	61
3.5	Efecto de la distancia entre la BS LTE y el receptor GSM-R	64
3.5.1	Efecto de la distancia sin filtro a la entrada del receptor GSM.R	65
3.5.2	Efecto de la distancia con filtro a la entrada del receptor GSM.R	67
3.5.3	Interferencias por dos portadoras LTE a una distancia corta	68
3.6	Presentación de los resultados	70
4	CONCLUSIÓN	75
	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS	79
	ACRÓNIMOS	83
	ANEXOS	87



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Velocidad de transmisión Vs. ancho de banda.....	4
Figura 2 Bandas de frecuencia LTE 800	4
Figura 3 Zona urbana con comunicaciones móviles de varios tipos	5
Figura 4 Bandas de frecuencia LTE-GSM-R y E-GSM-R (900 MHZ).....	6
Figura 5 Rango de frecuencias para espurios y emisiones OOB.....	9
Figura 6 Definición de la ACLR y la ACS.	11
Figura 7 Intermodulación banda estrecha	13
Figura 8 Intermodulación Banda ancha	13
Figura 9 Emisiones OOB BS Vs. Separación entre portadoras GSM y UMTS.....	20
Figura 10 Espectro que muestra la variación de potencia-Control automático de potencia	21
Figura 11 Emisiones OOB MS Vs. Separación entre portadoras GSM y UMTS	22
Figura 12 Atenuación del filtro en la banda E-GSM-R	24
Figura 13 Nivel de bloqueo del receptor UMTS Vs. Distancia entre MS y BS	25
Figura 14 Nivel de potencia para intermodulación Banda estrecha	26
Figura 15 Nivel de potencia para intermodulación Banda ancha	26
Figura 16 ACS VS separación entre antenas y ganancia.....	29
Figura 17 Circuito explicativo de la configuración de las medidas realizadas.....	30
Figura 18 Espectro-Medidas- Interferencias UMTS GSM-R.....	31
Figura 19 BER de una GSM-R de referencia	37
Figura 20 Circuito simulado con el AWR	39
Figura 21 Descripción del Transmisor LTE.....	41
Figura 22 Modulador OFDM.....	42
Figura 23 Etapa amplificadora LTE	43
Figura 24 Escenario 1-Separación de 4.6 KM entre BS LTE y MS GSM-R	45
Figura 25 Escenario 1-Espectro de las señales transmitidas	46
Figura 26 Intermodulación del amplificador LTE. Espectro a la entrada y a la salida.....	47
Figura 27 Escenario1-BER Sin filtro de entrada del receptor.	47
Figura 28 ACLR en función del nivel de potencia de la BS GSM-R.....	48
Figura 29 ACLR en función de la BER– Sin filtro de entrada del receptor	48
Figura 30 Respuesta en frecuencia del filtro del receptor GSM-R	49
Figura 31 Escenario1-BER con filtro de entrada del receptor	50
Figura 32 ACLR Vs BER- Con filtro de entrada del receptor	50
Figura 33 Espectro Canal Superior-separación entre canales de 6.8 MHZ	51
Figura 34 BER Canal superior-separación entre canales de 6.8 MHZ	52
Figura 35 ACLR-separación entre canales de 6.8 MHZ.....	52
Figura 36 ACLR en función de la BER- separación entre canales de 6.8 MHZ.....	53
Figura 37 Espectro Canal Superior BW 10 MHZ	54
Figura 38 BER Canal superior con ancho de banda de 10 MHZ	54
Figura 39 ACLR-Canal superior con un ancho de banda de 10 MHZ	55
Figura 40 ACL Vs BER Canal superior con un ancho de banda de 10 MHZ.....	55
Figura 41 Espectro Canal Superior con ancho de banda de 20 MHZ	56
Figura 42 BER canal superior con un ancho de banda de 20 MHZ.....	57
Figura 43 ACLR-Canal superior con ancho de banda de 20 MHZ	57



Figura 44 ACLR Vs. BER Canal superior con ancho de banda de 20 MHZ	58
Figura 45 Espectro- Dos portadoras interferentes de ancho de banda de 5 y 20 MHZ	59
Figura 46 BER-Dos portadoras interferentes de ancho de banda de 5 y 20 MHZ	60
Figura 47 ACLR para anchos de banda de 5 y 20 MHZ.....	60
Figura 48 Espectro- Interferencias de varios servicios. GSM, UMTS y LTE	61
Figura 49 BER - Interferencias de varios servicios. GSM, UMTS y LTE	62
Figura 50 ACLR- GSM, UMTS y LTE.....	63
Figura 51 Escenario 2. Separación de 25 metros entre BS LTE y MS GSM-R	64
Figura 52 Espectro- señal deseada e interferente con una separación entre BS de 25 m	65
Figura 53 BER- distancia de 25 metros entre la BS y MS, y sin filtro a la entrada del receptor ...	66
Figura 54 ACLR-Distancia entre la BS y MS 25 m. Sin filtro a la entrada del receptor	66
Figura 55 BER- distancia de 25 metros entre la BS y MS, y con filtro a la entrada del receptor ..	67
Figura 56 ACLR-Distancia entre la BS y MS 25 m. Con filtro a la entrada del receptor	67
Figura 57 Espectro- Dos señales interferentes a una distancia de 25 m al MS GSM-R	68
Figura 58 BER- distancia de 25 metros entre la BS y MS, Interferencias por dos portadoras.....	69
Figura 59 ACLR- interferencias por dos portadoras a una distancia de 25 m a la MS.....	69



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Bandas de frecuencia 900 MHz y ancho de banda.....	6
Tabla 2 Ancho de banda de redes públicas	6
Tabla 3 Ejemplo -Nivel máximo permitido de emisiones OOB	10
Tabla 4 ACLR BS GSM-R. Con intervalo de guarda de 300KHZ	12
Tabla 5 Características de red GSM-R	23
Tabla 6 Características de redes UMTS y LTE	23
Tabla 7 Ancho de banda LTE. Teórico y efectivo	23
Tabla 8 interferencias UL E-GSM-R a UMTS BS	25
Tabla 9 Resultados de las medidas de interferencias por GSM y UMTS	32
Tabla 10 Características del amplificador del receptor GSM-R.....	38
Tabla 11 Características del amplificador LTE	44
Tabla 12 Parámetros de la simulación Sin filtro a la entrada del receptor	46
Tabla 13 Parámetros de la simulación con filtro a la entrada del receptor	49
Tabla 14 Parámetros de la simulación- canal superior de 5 MHz.....	51
Tabla 15 Parámetros de la simulación- canal superior 10MHz.....	53
Tabla 16 Parámetros de la simulación- canal superior- 20 MHz.....	56
Tabla 17 Parámetros de simulación dos portadoras LTE interferentes	59
Tabla 18 Parámetros de simulación- interferencias por GSM, UMTS y LTE.....	61
Tabla 19 Parámetros de simulación- Distancia entre BS y MS de 25 metros.....	65
Tabla 20 Parámetros de simulación. Interferencia por 2 portadoras-Escenario 2	68
Tabla 21 Resultados- Efecto del filtro-BER con interferencias.....	70
Tabla 22 Resultados- Efecto del filtro-ACLR-BW de la señal interferente de 5 MHz.....	70
Tabla 23 Resultados- Separación entre portadoras y ancho de banda.....	70
Tabla 24 Resultados- Banda estrecha	71
Tabla 25 Resultados-Variación de la BER en función de la distancia	71



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

- 1.1.Situación actual y bandas de frecuencia
- 1.2.Emisiones no deseada
- 1.3.Relación de fugas del canal adyacente ACLR
- 1.4.Intermodulación



INTRODUCCIÓN



1 INTRODUCCIÓN

Actualmente las nuevas tecnologías están arrasando en el mercado y cada vez hay más usuarios que utilizan estas tecnologías, el desarrollo de las comunicaciones móviles empezó en los años 90 con la aparición de la segunda generación de móviles que fue desarrollada en Europa con el estándar GSM, a principios del año 2000 apareció en el mercado la tercera generación 3G que se desarrolló con el protocolo UMTS y ofrecía un ancho de banda de 5MHz y una velocidad binaria mucho más alta que llegaba en el enlace descendente hasta 384 Kbps.

Con el objetivo de ofrecer una velocidad de transmisión más alta y por lo tanto un ancho de banda mucho mayor, la tecnología 3G ha sido evolucionando a lo largo de los 10 años (2000-2010), hasta llegar a velocidades de 40 Mbps en el enlace descendente con el estándar HSPA+ conocido en el mercado como 3.5G, a partir del año 2010 se empezó el estudio del estándar LTE que tiene como objetivo ofrecer una velocidad binaria de hasta 100Mbps en el enlace descendente y un ancho de banda adaptativo que podría llegar hasta 20MHz y otras características que detallaremos más adelante.

Como consecuencia de esta evolución en las comunicaciones móviles surgió el problema de las interferencias entre diferentes protocolos de comunicación que están en bandas cercanas, especialmente las interferencias entre las emisiones GSM-R y las comunicaciones de red pública en la banda 900 MHz. Con la llegada de LTE las comunicaciones GSM-R se verán afectadas por un lado por el gran ancho de banda de las emisiones LTE, y por otro lado por la reutilización de las bandas de frecuencias de la televisión analógica para telefonía móvil que también son adyacentes a las bandas de GSM-R.

El ancho de banda de la señal LTE que puede llegar hasta 20 MHz, frente a los 200 KHz de GSM-R, agrava aún más la situación ya que el nivel de interferencias aumenta de forma progresiva por la cercanía de esta banda a la banda de frecuencia de las comunicaciones GSM-R, esta última se verá afectada por interferencias de las señales emitidas por las estaciones base, dominados como eNodeB, de la red LTE, y debido a que los nuevos terminales de última generación exigen cada vez más ancho de banda y por lo tanto un espectro más grande lo que aumenta aún más el nivel de las interferencias.

En la *figura 1* podemos observar la variación del ancho de banda de diferentes protocolos de comunicaciones móviles y el grado de movilidad que soportan dichos protocolos, podemos apreciar que el ancho de banda es muy diferente entre LTE y GSM-R, pero soportan el mismo nivel de movilidad.

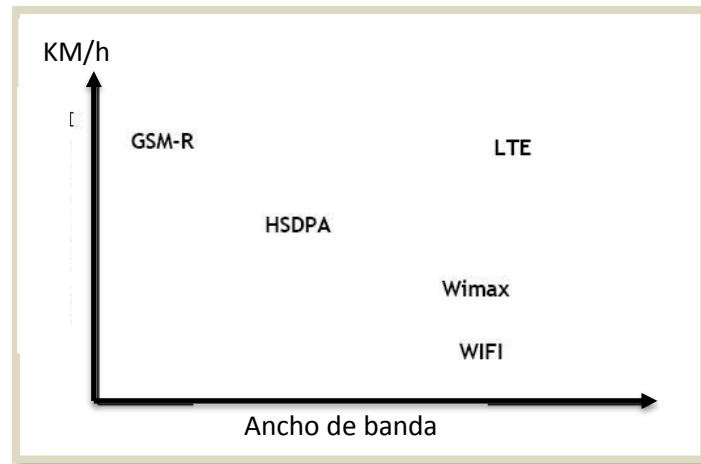


Figura 1 Velocidad de transmisión Vs. ancho de banda

Por otro lado, el nuevo reparto de espectro entre los operadores de TDT deja libre la banda de 800MHZ, lo que se conoce como el “*DIVIDENDO DIGITAL*”¹, que se podría aprovechar para la implementación de los servicios de las redes públicas LTE, UMTS y GSM, en la figura 2 se pueden ver las bandas de los enlaces ascendente y descendente.



Figura 2 Bandas de frecuencia LTE 800

En este proyecto se pretende analizar las emisiones de ambos protocolos mediante simulaciones y medidas que se van a detallar en los capítulos posteriores para poder describir el problema desde el punto de vista tecnológico, y ver como se afectan las comunicaciones ferroviarias por las redes públicas.

¹ Se conoce como dividendo digital al proceso por el cual las frecuencias de entre 790 y 862 MHz (canales 61 al 69 de UHF) dejarán a ser usadas para transmisión de televisión terrestre y serán asignadas a las operadoras de telefonía móvil.



1.1 Situación actual y bandas de frecuencia

El sistema LTE se está desarrollando para redes de comunicaciones públicas para dar servicio de voz, datos, acceso a internet, etc. Se estima que en 2015 casi el 85% de los usuarios de telefonía móvil estarán utilizando esta tecnología. Este estándar de comunicaciones móviles llegará para ofrecer mejor rendimiento que los sistemas actuales, GSM, UMTS, HSPA, etc.

Sin embargo, el sistema GSM-R es una red privada que ha sido implementada para las comunicaciones ferroviarias y que puede soportar comunicación a altas velocidades, hasta 500 Km/h, el sistema GSM-R está basado en GSM pero se implementa justo en la banda de frecuencias adyacentes (876-880, 921-925) MHz.

Un escenario típico de comunicaciones móviles se puede ver en *la figura 3*, donde se ven varios servicios de comunicaciones en una zona urbana con alto tráfico de redes públicas y privadas con cercanía a estación móvil de red GSM-R, que puede ser perjudicada por interferencias de varios tipos.

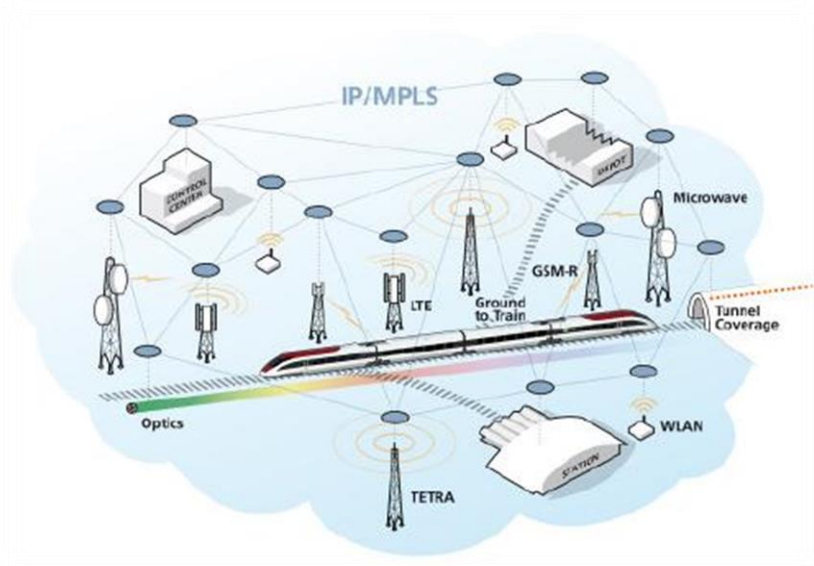


Figura 3 Zona urbana con comunicaciones móviles de varios tipos

En un principio la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) asignó a las operadoras la banda de frecuencia de 2600 MHz para el desarrollo y las pruebas de la red LTE, pero debido a las dificultades de trabajar a frecuencias altas, como bien sabemos aumenta la atenuación y como consecuencia se reduce la zona de cobertura, y sobre todo la dificultad de dar cobertura en interiores para frecuencias tan elevadas, se decidió por parte de las operadoras implementar la tecnología LTE en la banda de 900 MHz que se está utilizando actualmente para las comunicaciones móviles con los estándares GSM, UMTS, HSPA, etc.



INTRODUCCIÓN

En la figura 4, se muestran los rangos de frecuencia de diferentes servicios de comunicaciones donde podemos apreciar la proximidad de ambos bandas.



Figura 4 Bandas de frecuencia LTE-GSM-R y E-GSM-R (900 MHz)

A continuación detallamos las bandas de frecuencias separándolas en enlace ascendente y descendente, también podemos ver los diferentes anchos de banda y la modulación que utiliza cada protocolo.

Tabla 1 Bandas de frecuencia 900 MHz y ancho de banda

	Enlace ascendente (MHZ)	Enlace descendente (MHZ)	Ancho de banda de canalización	Modulación
E-GSM-R	873-876	918-921	200 KHZ	GMSK
GSM-R	876-880	921-925	200 KHZ	GMSK
Redes públicas	880-915	925-960	*	*

*El ancho de banda de canalización y la modulación de las redes públicas depende del estándar de la red, LTE, UMTS o GSM, en la tabla 2 detallaremos los anchos de banda y la modulación utilizada por cada uno.

Tabla 2 Ancho de banda de redes públicas

Estándar	Ancho de banda de canalización	Modulación
GSM	200 KHZ	GMSK
UMTS	5MHZ	QPSK
LTE	1,4 – 3 – 5 – 15 – 20 (MHZ)	Modulación Adaptativa ²

Como hemos explicado anteriormente los rangos de frecuencia asignados previamente al desarrollo de redes GSM, UMTS se utilizaran para el despliegue de la red LTE, la red LTE necesita una ancho de banda mucho más grande que los protocolos anteriores.

²El canal dispone de un decisor que permite al sistema escoger el orden de la modulación en función de las condiciones del canal, estas modulaciones son QPSK, 16-QAM o 64 QAM.



INTRODUCCIÓN

El sistema ferroviario se verá afectado de forma directa por la cercanía de ambos bandas de frecuencia, por lo que sufrirán interferencias de las eNodeB de la red LTE, las interferencias pueden afectar a las comunicaciones GSM-R de dos formas:

- Emisiones OOB³ (fuera de banda) procedentes del eNodeB de la red LTE que dificulta la demodulación de la señal GSM-R por el receptor, posteriormente probaremos mediante simulaciones la posibilidad de reducir estas emisiones con los filtros.
- Bloqueo del receptor GSM-R por las señales fuertes de la red LTE, este tipo de interferencias se puede reducir poniendo atenuadores a la entrada del receptor GSM-R.

Para reducir el impacto que tendrá LTE en las comunicaciones GSM-R, se ha propuesto una solución por la administración que consiste en una coordinación entre las operadoras móviles y la de red GSM-R a la hora de la implementación de las estaciones base LTE, respetando los niveles de emisión del eNodeB dependiendo de la zona, rural, urbana, alto tráfico de trenes, etc.

El objetivo de este estudio es medir el rendimiento real de la red GSM-R en presencia de interferencia de la red LTE, determinando los niveles exigidos de emisión de esta última para un correcto funcionamiento de las comunicaciones GSM-R, en este estudio haremos simulaciones con y sin filtros a la entrada del receptor GSM-R, también mediremos algunos parámetros relacionados con las emisiones OOB para varios niveles de potencia y diferentes separaciones entre las portadoras GSM-R y LTE. Además veremos cómo afectan las interferencias de emisiones de banda estrecha, GSM, a la red GSM-R, y analizaremos la diferencia entre ambos tipos de interferencias.

1.2 Emisiones no deseadas

Las emisiones no deseadas que provienen del transmisor LTE se dividen en dos tipos, emisiones fuera de banda y espurios. Las emisiones fuera de banda se definen como emisiones que provienen de una emisión en una frecuencia cercana a la frecuencia de la portadora que se desea transmitir que se produce como fruto del proceso de la modulación. Los espurios se pueden reducir sin afectar la transmisión de la información. Generalmente las emisiones no deseadas provienen de los armónicos, productos de intermodulación, especialmente el de tercer y quinto orden. El rango de frecuencias donde se producen las emisiones fuera de banda se define como el dominio de emisiones OOB, mientras al de los espurios se denomina como el dominio de los espurios.

³ OOB: out of band, a lo largo de este proyecto utilizaremos estas siglas refiriendo a las emisiones fuera de banda.



INTRODUCCIÓN

La UIT define el límite entre el dominio OOB y el dominio de los espurios a una frecuencia con separación de la frecuencia central de 2.5 veces el ancho de banda necesario para esta emisión. Este requisito se puede aplicar fácilmente en el caso de UMTS y GSM que dispone de un ancho de banda fijo, pero en el caso de LTE que dispone de un ancho de banda adaptativo, esto implica que el rango de frecuencia libre de las emisiones fuera de banda varía dependiendo del ancho de banda de la señal transmitida.

El espectro de una señal OFDM se decae lentamente fuera del ancho de banda de transmisión, y como la señal ocupa el 90% del ancho de banda del canal, esto dificulta determinar los límites de la emisión no deseada de una señal OFDM. En las técnicas utilizadas para determinar los límites de estas emisiones no especifica el caso de las emisiones LTE. Sin embargo, actualmente se utilizan técnicas de procesamiento de la señal como TDW (ventana en el dominio del tiempo), que se basa en la DFT (transformada discreta de Fourier), y se utiliza para controlar el rango de emisión del espectro, también se utiliza la técnica del filtrado, tanto en el dominio analógico como digital, pero dado que en el enlace descendente la señal RF se amplifica con amplificadores que tienen características no lineales lo que genera intermodulación a unas determinadas potencias por lo que el control de potencia y la linealización de los amplificadores LTE son parámetros muy importantes a la hora de estudiar el efecto de las emisiones no deseadas.

Los límites de emisiones no deseadas que se deben cumplir dependerán de un rango dinámico de las especificaciones del transmisor, tanto en términos de control de potencia o de requisitos adicionales como el EVM (error de frecuencia), que afecta a la calidad de la modulación lo que diferencia una señal OFDM ideal de una transmisión real.

En la *figura 5* podemos ver los límites de las emisiones no deseadas para LTE que afectan a las emisiones de las bandas adyacentes, como se ve en la figura los límites se aplican en toda la banda de la BS dejando un margen de 10 MHz por cada lado.

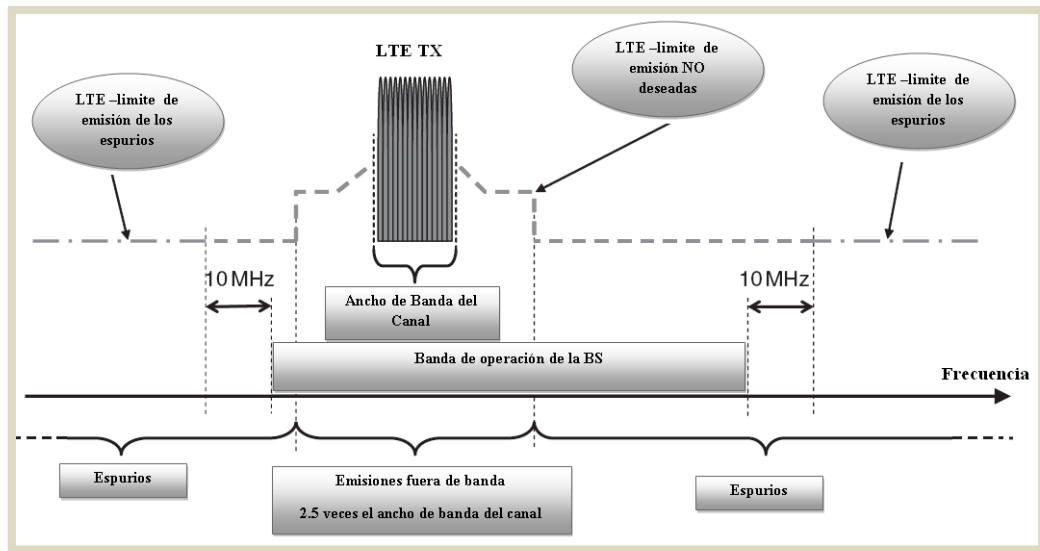


Figura 5 Rango de frecuencias para espurios y emisiones OOB

Estos límites definidos están basados en los requisitos de recomendación SM.1535 de la UIT_R [1] que define los límites requeridos para espurios y emisiones fuera de banda. Como el rango de frecuencias de las emisiones no deseadas se define para un ancho de banda fijo en el caso de aumentar el ancho de banda la señal transmitida tendrá gran parte de la misma fuera de la banda de transmisión lo que obliga a que el rango de las emisiones OOB sea dinámico ajustándolo en función del ancho de banda, fijando dicho rango en 2.5 veces el ancho de banda de la señal RF transmitida.

En cambio, debido a que el nivel de los espurios es más bajo que las emisiones fuera de banda, los límites de los espurios se definen en un rango de frecuencia que está separado por 10 MHz de la portadora LTE como se puede ver en la figura mostrada arriba.

1.3 Relación de fugas del canal adyacente ACLR

La ACLR (en algunos reportes de la ECC se denomina ACPR), es la relación que define las emisiones fuera de banda que interfieren a la señal deseada, que es una medida que se utiliza para analizar la co-existencia entre dos sistemas que están en frecuencias adyacentes. La ACLR determina la relación entre el nivel de potencia de la señal deseada respecto al nivel de fugas de las emisiones OOB. Esta relación de fugas está relacionada con la ACS, selectividad del canal adyacente, que define el nivel de selectividad del receptor y su capacidad para eliminar la señal del canal adyacente.



INTRODUCCIÓN

El nivel de interferencias permitido por las emisiones OOB se puede calcular, calculando el nivel de ruido del receptor sin interferencias y con interferencias.

El nivel de ruido del receptor se puede expresar en función de los parámetros del receptor según la ecuación (1).

$$NF_{\text{sin interferencias}} = 10^{\frac{KTB+F_n}{10}} \text{ mW} \quad (1)$$

Tomando en cuenta la degradación del nivel de ruido por interferencias (2), el nivel de ruido se degrada en función de un factor de degradación η .

$$NF_{\text{con interferencias}} = 10^{\frac{KTB+F_n}{10}} \cdot 10^{\frac{\eta}{10}} \text{ mW} \quad (2)$$

A continuación definimos los parámetros de las ecuaciones (1) y (2).

K : la constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$

T : Temperatura del ambiente 288 K.

B : Ancho de banda

F_n : Factor de ruido

η : Degradación de la sensibilidad del receptor

El producto $K.T$ se define como constante -174 dB

El nivel de las emisiones fuera de banda se puede expresar según la ecuación (3)

$$P_{\text{OBB-TX}} = NF_{\text{sin interferencias}} - NF_{\text{con interferencias}} \quad (3)$$

Simplificando la ecuación (3) podemos expresar el nivel de emisiones OOB en dBm (3*) como:

$$P_{\text{OBB-TX}} = K.T + 10 \log B + F_n + 10 \log(10^{\frac{\eta}{10}} - 1) \text{ dBm} \quad (3^*)$$

En la *tabla 3* aplicaremos estos cálculos para una señal GSM-R y LTE con un ancho de banda de 5 MHz para una degradación de la sensibilidad del receptor de 0.5 y 1 dB.

Tabla 3 Ejemplo -Nivel máximo permitido de emisiones OOB

	GSM-R		LTE 5MHZ	
KT (dB)	-174			
B (HZ) (real)	200000		3 840 000	
F _n (dB)	8		5	
KT _B + F _n (dBm)	-113		-103	
η (dB)	0.5	1	0.5	1
P _{ORB-TX} (dBm)	-122.1	-118.9	-112.3	-109



En la figura 6 vienen definidas ambas relaciones para una emisión de RF respecto a una señal interferente, la relación entre el nivel de fugas de la señal interferente respecto al nivel de la señal deseada se define con la ACLR, mientras la capacidad del receptor viene determinada por la ACS.

Siguiendo los pasos anteriores podemos calcular la ACS, ecuación (4), en función de la potencia de la señal interferente y otros parámetros.

$$ACS = P_{interfrente} - K.T - 10 \log B - F_n - 30 - 10 \log \left(10^{\frac{P_{deseada}}{10}} - 1 \right) \text{ dB} \quad (4)$$

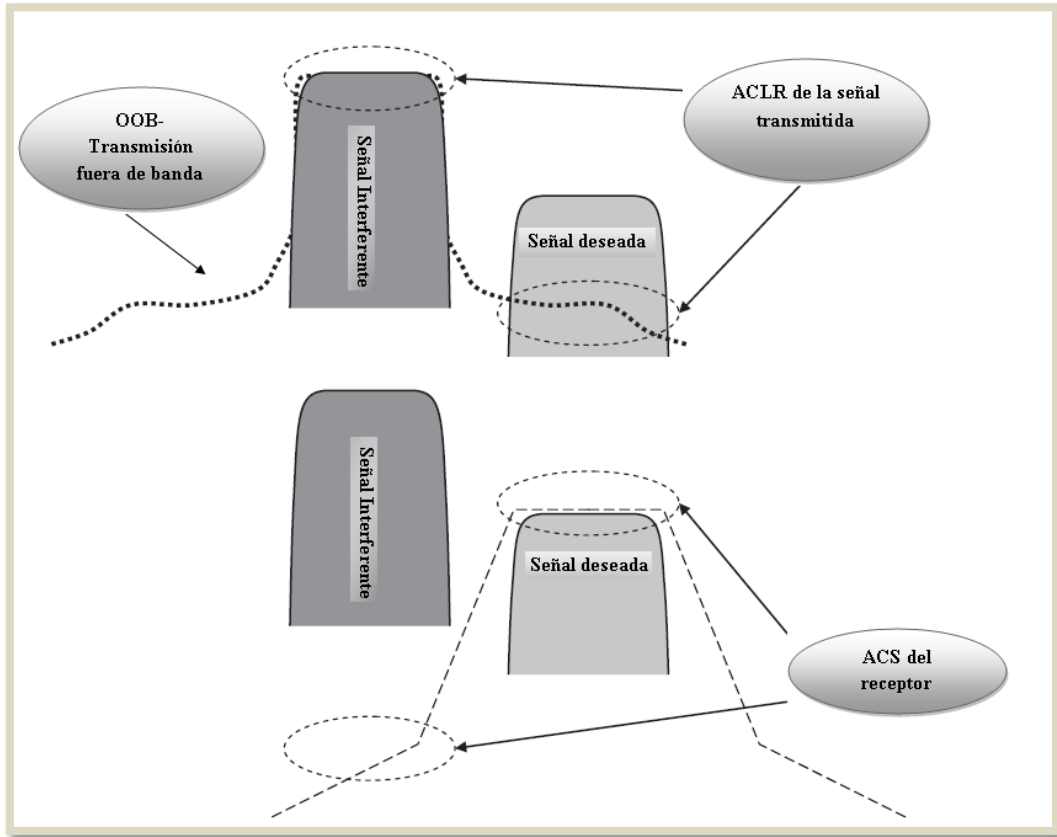


Figura 6 Definición de la ACLR y la ACS.

Ambos parámetros definidos en la figura 6 definen la ACIR, relación de interferencias del canal adyacente, la ACIR se define como la relación de potencia transmitida en un canal respecto a la interferencia total recibida por un receptor del canal adyacente, esta relación se define matemáticamente con la siguiente ecuación.

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (5)$$



INTRODUCCIÓN

La ACLR y la ACS, se definen dependiendo del ancho de banda de los canales adyacentes que es un requisito imprescindible en el caso de la transmisión LTE con ancho de banda adaptativo, la ecuación (5) se puede aplicar para cualquier ancho de banda y tanto para transmisión en banda estrecha como en banda ancha.

Los límites de la ACLR y ACS se han definido mediante un estudio que está detallado en el REPORT 40 [2] del ECC (Comité Europeo de las Comunicaciones) que se basa en la co-existencia entre las diferentes redes públicas, especialmente LTE, y las otras comunicaciones en la banda adyacente como es el caso de GSM-R.

En la *tabla 4*, mostramos los resultados de medida del ACIR para UMTS y LTE con diferentes anchos de banda, se puede ver que el ACIR está dominado por la ACLR y la contribución de la ACS es insignificante.

Tabla 4 ACLR BS GSM-R. Con intervalo de guarda de 300KHZ

	BS ACLR (dB/200KHZ)	MS ACS (dB)	ACIR (dB)
UMTS-5MHZ	50	68.7	49.9
LTE-1.4MHZ	50	58.7	49.5
LTE-3MHZ	50	68.7	49.9
LTE-5MHZ	50	68.7	49.9
LTE-10MHZ	50	78.7	50
LTE-15MHZ	50	78.7	50
LTE-20MHZ	50	78.7	50

La ACLR es una medida que se debe tener en cuenta para los receptores de comunicaciones privadas como GSM-R que se ven afectados por las interferencias de la red LTE, y también para los receptores LTE que se ven afectados por interferencias de otras redes de comunicación.

1.4 Intermodulación

En caso de una señal interferente de banda estrecha, como GSM, con un nivel de potencia alto, 43 dBm, la intermodulación de tercer orden puede enmascarar parcialmente la señal deseada de la emisión GSM-R, dependiendo de las frecuencias de las portadoras GSM-R y la de la señal interferente. En la *figura 7* podemos ver un ejemplo de la intermodulación de tercer orden producida por una emisión GSM que cae muy cerca de la emisión GSM-R, se puede ver cómo afecta la relación señal interferencias, C/I, entre ambas comunicaciones.



INTRODUCCIÓN

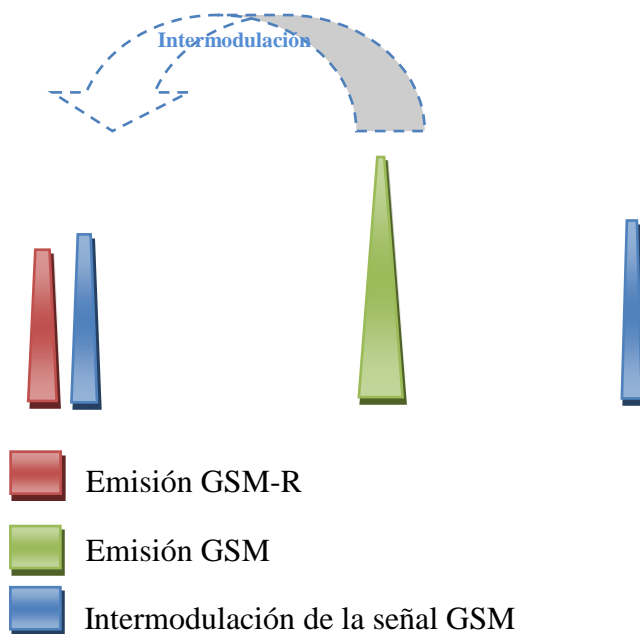


Figura 7 Intermodulación banda estrecha

En este caso el nivel de potencia de la señal interferente es más alto que el nivel de la señal deseada lo que podría causar pérdidas en las comunicaciones GSM-R. Es un caso típico cuando un tren basa justo al lado de una BS GSM.

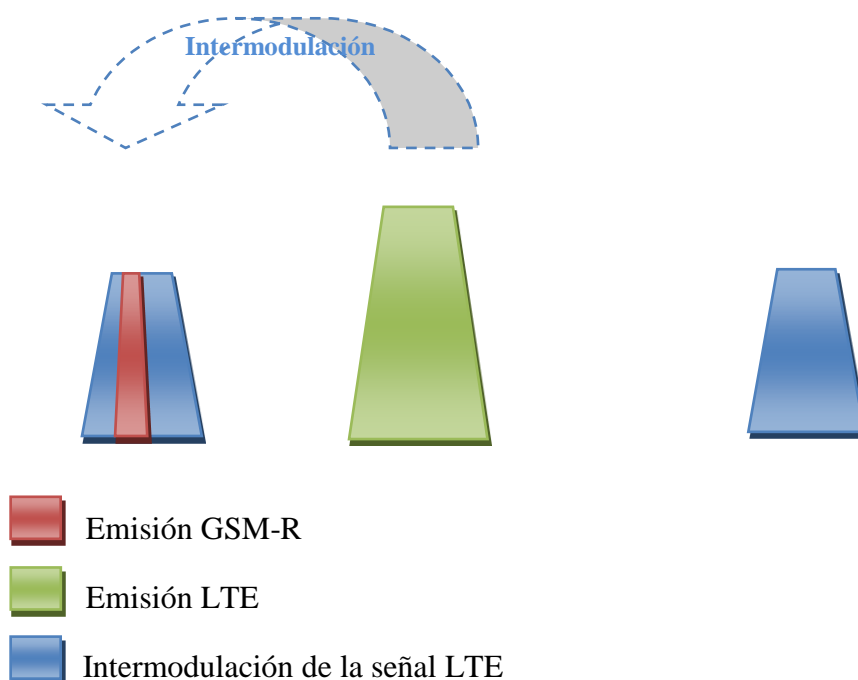


Figura 8 Intermodulación Banda ancha



INTRODUCCIÓN

En el caso de una señal de banda ancha como es el caso de señales LTE, la probabilidad es aún más alta para enmascarar la señal GSM-R, ya que el ancho de banda de estas comunicaciones es mucho más alto que varía entre 1.4-20 MHz frente a los 200 KHz de las portadoras de banda estrecha, en *la figura 8* podemos ver cómo afecta ancho de banda de la señal LTE la señal GSM-R pudiendo enmarcarla totalmente, en el peor de los casos.

Las emisiones de banda ancha aumentan el riesgo de que los productos de intermodulación caen muy cerca de la banda de frecuencias de GSM-R, como hemos explicado anteriormente, pudiendo llegar a perder la comunicación por causa de interferencias procedentes de una única portadora LTE, en escenario real donde hay varias emisiones de banda ancha la probabilidad de interferencias debidos a la intermodulación se incrementa notablemente.

En el caso de emisiones de banda estrecha la probabilidad de intermodulación es más baja, pero en casos como el mostrado anteriormente, el nivel de potencia afecta a la relación C/I entre la señal deseada y la interferente.

Estos problemas afectan directamente el sistema ferroviario, según la ETCS (sistema de control ferroviario europeo), realizando medidas en tramos de 100 Metros, el servicio GSM-R se debe garantizar en el 95% del tramo con una llamada caída cada 100 horas y un retardo máximo en la comunicación de 500ms, como consecuencia de las interferencias podrán obligar a una circulación con una velocidad limitada debido al no poder efectuar la comunicación entre estaciones y trenes y hacer llamadas de emergencia o incluso podrá provocar una suspensión temporal en el servicio ferroviario, en general las interferencias podrán provocar:

- Llamadas fallidas.
- Pérdida de las llamadas.
- Baja calidad en la transmisión de voz o datos.
- Alta tasa de error de bits, BER.
- Interrupción del servicio.

Según los estudios realizados por la ECC reflejados en el REPORT 162 [3] basados en simulación Monte Carlo independientemente de la canalización y el ancho de banda de la señal LTE, no es necesario un intervalo de guarda entre las bandas LTE y GSM-R para la co-existencia de ambos servicios en la misma zona, dicho informe llega a la conclusión de que una separación entre las dos portadoras, LTE y GSM-R, más cercanas de 10MHz es suficiente para poder implementar ambas comunicaciones en la misma zona. Además para una emisión de red públicas con menos ancho de banda como UMTS, que tiene un ancho de banda de 5MHz basta con una separación de 2.8 MHz para no perjudicar la emisión GSM-R, siempre que la relación portadora-interferencias, C/I, entre la señal GSM-R y la señal de red pública es mayor o igual a 12 dB.



INTRODUCCIÓN

Sin embargo, en zonas críticas como las de mayor intensidad de antenas, y zonas de menor población donde puede haber estaciones base de la red LTE cercanas a las vías de circulación de los trenes, por lo que podrá provocar acoplamiento debido a que el receptor y el transmisor están en situación de vista directa “LOS”, se necesitara aumentar la relación C/I para evitar los efectos de las interferencias, o implementar otros tipos de soluciones como las técnicas de filtrado, o poner atenuadores auto-adaptables a la entrada del receptor GSM-R para atenuar los niveles de potencia de la señal no deseada, en definitiva la coordinación a la hora de la implementación es muy importante.



INTRODUCCIÓN



CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

- 2.1. Efecto de las interferencias en los enlaces ascendente y descendente
- 2.2. Características de los transmisores y receptores
- 2.3. Técnicas para reducir el impacto de las interferencias
- 2.4. Medidas de interferencias
- 2.5. Conclusión



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS



2 ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

En este capítulo analizaremos los efectos de las interferencias en los enlaces ascendente y descendente, veremos cómo se afectan las estaciones base GSM-R por las emisiones no deseadas procedentes tanto de las estaciones base LTE como de las MS LTE, también se verá cómo afectan las interferencias de las emisiones GSM-R a la red LTE.

Además, veremos las características de los transmisores y receptores de las redes públicas y los niveles de emisión de las BS, y como afectan dichos niveles a los receptores GSM-R que pueden estar a una distancia corta de las BS de la red pública, se verán los niveles emisión permitidos por el organismo regulador, tanto para las BS de la red pública como las de GSM-R, y por otra parte analizaremos diferentes soluciones para reducir el impacto de las redes públicas sobre GSM-R, como el uso de filtros o el control automático de potencia, etc.

Por ultimo presentaremos algunas medidas de interferencias entre redes públicas y GSM-R, y mostraremos los resultados obtenidos para varios casos.

2.1 Efecto de las interferencias en los enlaces ascendente y descendente

Como hemos explicado en el apartado anterior, debido a la cercanía de la banda de frecuencias de las redes públicas LTE, UMTS, GSM a la de GSM-R, esta última se verá afectada por las interferencias, vamos a explicar cómo se verán afectados los enlaces ascendentes y descendentes.

Como podemos ver en *la figura 4*, mostrada en apartado anterior, la banda del enlace ascendente del LTE está justo por debajo del enlace descendente de la banda GSM-R, este enlace se verá interferido por varias señales LTE y otros servicios de comunicación por lo que para tener un margen de interferencias libre en el transmisor y el receptor GSM-R tenemos que tener en cuenta la suma de todas estas señales que afecten el enlace descendente de la comunicación GSM-R.

Según las especificaciones de ETSI (Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones) para las estaciones móviles (MS) de banda ancha en la banda de 900, como es el caso de LTE, los requisitos sobre el espectro de emisión son muy bajos, pudiendo utilizar estaciones fijas que operen en la banda de 900 en las proximidades de las estaciones ferroviarias, lo que crea altos niveles de interferencias.

Sin embargo, en zonas urbanas donde hay cientos de estaciones móviles que interfieren, hace imposible predecir la suma de interferencias de todas estas estaciones sobre el transmisor GSM-R. Estas interferencias necesitan un profundo estudio para analizar plenamente todos los posibles casos, teniendo en cuenta varios



factores que podemos resumir en algunos que vienen recogidos por estadísticas realizadas por la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles) que son:

- Número total de señales interferentes.
- Reparto por países.
- Impacto por aplicación o por servicio.
- Tamaño de la zona afectada por las interferencias.
- Planificación de cobertura, capacidad, tráfico, etc.

2.1.1 Enlace descendente GSM-R

En zonas urbanas con muchas BS la coordinación es necesaria en un rango de 4km, y es necesario utilizar filtros y atenuadores a la entrada del receptor GSM-R, este caso en concreto es el que más perjudica las comunicaciones GSM-R. En el caso de interferencias por UMTS o GSM que disponen de un ancho de banda fijo podemos definir el nivel de las interferencias en función de la separación entre portadoras y el nivel de potencia de las mismas, *figura 9*, sin embargo en caso de LTE que dispone de un ancho de banda adaptativo lo que dificulta la prevención del nivel de las emisiones OOB.

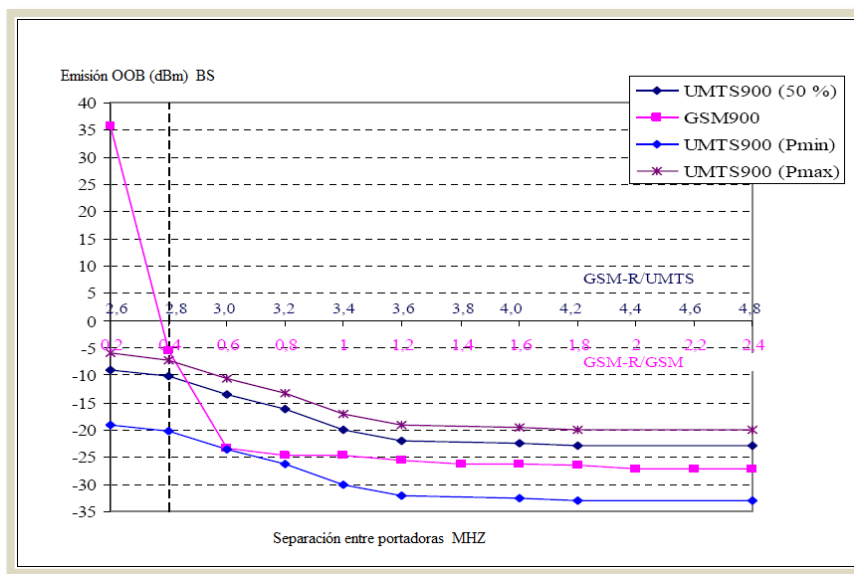


Figura 9 Emisiones OOB BS Vs. Separación entre portadoras GSM y UMTS

La *figura 9* muestra los niveles de emisiones OOB para señales de banda estrecha y banda ancha que afectan a la comunicación GSM-R en función de la separación entre portadoras de ambas emisiones, y en función de la potencia transmitida por la BS de la señal interferente, como podemos ver en el caso de interferencias de banda estrecha el nivel de emisiones OOB baja notablemente al incrementar la separación entre portadoras. En el apartado de simulaciones, simularemos varios casos con interferencias LTE.



2.1.2 Enlace ascendente GSM-R

Las emisiones GSM-R se verán afectadas por emisiones de la estación base LTE que tengan un ancho de banda mayor que 10 MHz, esta situación se puede reducir activando el control automático de potencia en el enlace ascendente de la señal GSM-R lo que nos permite aumentar la potencia de la emisión GSM-R y mejorar la relación ACLR en la figura 9 podemos apreciar en el espectro mostrado a la derecha como podemos distinguir la señal GSM-R, mientras que en espectro de la izquierda la señal LTE enmascara parcialmente la señal GSM-R. Otra solución sería aumentar la separación entre las portadoras GSM-R lo que permite transmitir en la banda extendida GSM-R.

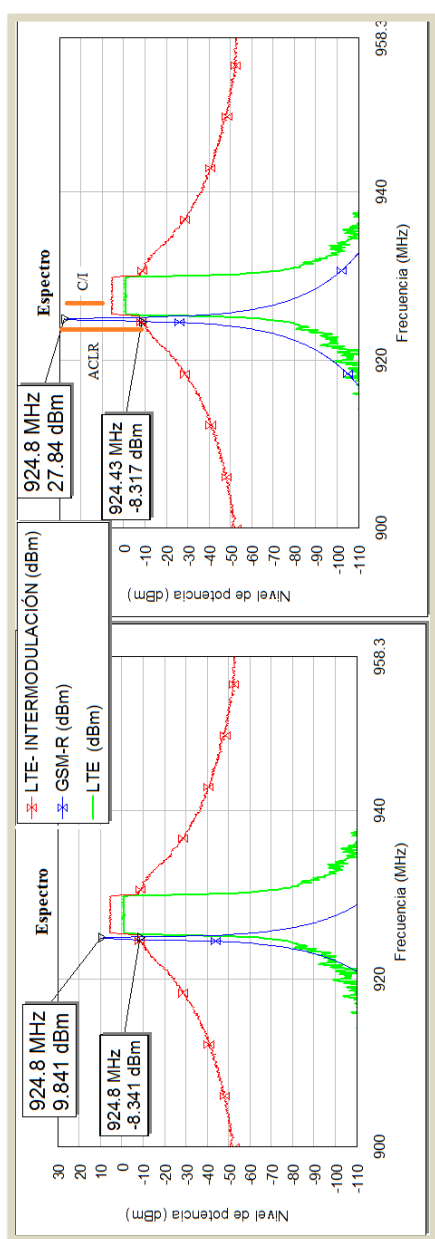


Figura 10 Espectro que muestra la variación de potencia-Control automático de potencia



2.1.3 Enlaces ascendentes GSM-R y LTE

La potencia máxima que emite MS LTE en la banda de 900 MHz es de 2 W, 33dBm, teniendo en cuenta que en el 90% de los casos emite menos de 14 dBm y de que las pérdidas de acoplamiento entre las estaciones móviles son grandes, 80dB en zonas rurales, la señal interferente tendrá un nivel por debajo de -66 dBm por lo que las interferencias en este caso apenas afectan.

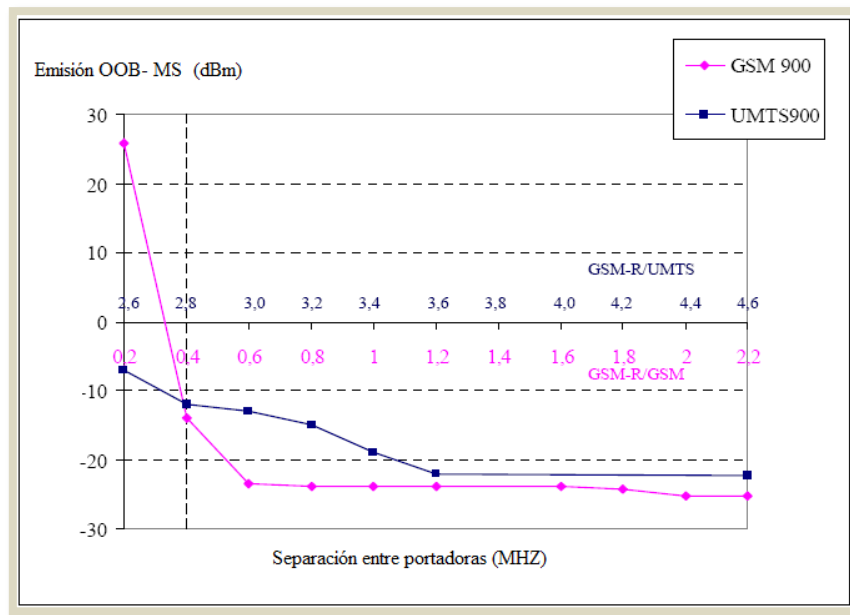


Figura 11 Emisiones OOB MS Vs. Separación entre portadoras GSM y UMTS

Como se ve en la figura 11 el nivel de emisiones OOB de un terminal móvil está mayormente por debajo de -10 dBm, y al aumentar la separación entre canales estas emisiones estarán por debajo de -20 dBm, además si a estos niveles restamos las pérdidas por acoplamiento y espacio libre, la emisión OOB procedentes de una MS estarán entre -90 y -100 dBm.

2.1.4 Enlaces descendentes GSM-R y LTE

Las interferencias introducidas por la estación base GSM-R sobre la BS LTE perjudican el receptor LTE, las emisiones GSM-R causan bloqueo del receptor LTE, los efectos de las interferencias se reducen notablemente si recurrimos a la banda extendida E-GSM-R

La banda de extendida E-GSM-R ha sido diseñada para proteger de manera eficiente la parte superior de la banda 900 MHz. Esta banda está justo en la parte inferior de la banda GSM-R (873-876/ 918-921), lo que permite una separación mayor entre los bordes del canal LTE y GSM-R.



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

En las tablas 4 y 5 figuran algunos parámetros típicos de las estaciones base de las señales de banda ancha como UMTS, LTE, GSM,-R como podemos apreciar las alturas y potencias máximas transmitidas son iguales tanto para receptores UMTS como LTE, mientras que otras características que dependen del ancho de banda cambian debido al ancho de banda adaptativo de la red LTE.

Tabla 5 Características de red GSM-R

	Estación Base BS	Unidad Móvil MS	Unidad Móvil tren
Separación entre portadoras (KHZ)	200		
Potencia Máxima transmitida (dBm)	43	33	39
Ganancia de las antenas TX	18	0	
Altura Máxima de las antenas(m)	45 (Zona rural) 20 (Zona urbana)	1.5	4
Separación entre portadoras (KHZ)	200		
Sensibilidad del receptor (dBm)	-110	-102	-104

Tabla 6 Características de redes UMTS y LTE

	Estación Base BS	Unidad Móvil
Separación entre portadoras (MHZ)⁴	5	
Potencia Máxima transmitida (dBm)	43	33
Ganancia de las antenas TX	15 (Zona urbana) 18 (Zona rural)	0
Altura Máxima de las antenas(m)	45 (Zona rural) 30 (Zona urbana)	1.5
Ancho de Banda efectivo (MHZ)	3.84	3.84
Sensibilidad del receptor (dBm)	-121	-114

Tabla 7 Ancho de banda LTE. Teórico y efectivo

Ancho de banda de la portadora (MHZ)	Ancho de Banda efectivo (MHZ)	Separación entre portadoras (MHZ)
1.4	1.08	1.08
3	2.7	2.7
5	4.5	4.5
10	9	9
15	13.5	13.5
20	18	18

⁴En los receptores y transmisores LTE el ancho de banda efectivo y la separación entre canales depende del ancho de banda de la portadora en la tabla 4 mostraremos los valores de cada caso.



Como se puede ver en *la tabla 7* la separación entre portadoras es igual al ancho de banda efectivo, lo que permite aprovechar todo el espectro sin necesidad de dejar un intervalo de guarda entre portadoras.

2.1.5 Interferencias en la banda extendida E-GSM-R

Las emisiones fuera de banda, OOB, de las redes públicas afectan menos a la banda extendida del enlace descendente E-GSM-R ya que la atenuación de los filtros de transmisión es mayor en el borde de la banda del enlace ascendente LTE, típicamente 30 dB, en *la figura 12* podemos ver una gráfica explicativa con un filtro paso banda ideal.

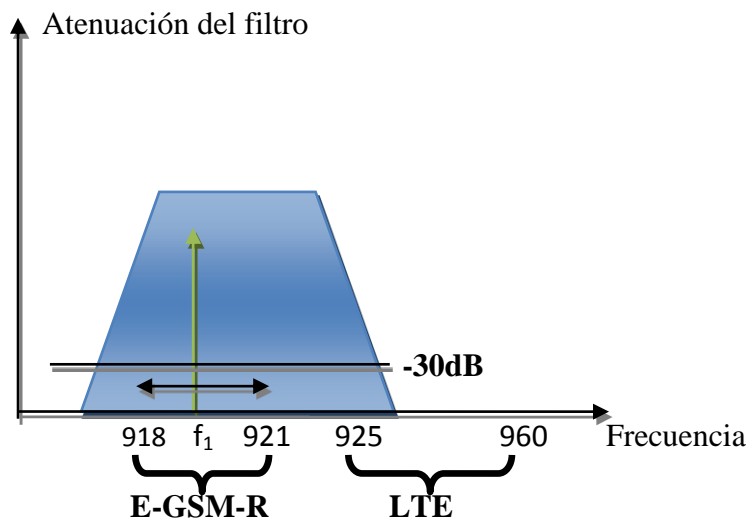


Figura 12 Atenuación del filtro en la banda E-GSM-R

La separación entre portadoras reduce el efecto de las emisiones fuera de banda ya que estas emisiones disminuyen a medida que se alejan de la frecuencia central, sin embargo el nivel de estas emisiones depende del nivel de potencia transmitido y la distancia a la que se encuentra el receptor interferido, en *la tabla 8* podemos ver cómo afecta la distancia entre las estaciones base UMTS y GSM-R, a los niveles de bloqueo del receptor UMTS.



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

Tabla 8 interferencias UL E-GSM-R a UMTS BS

Distancia entre GSM-R y UMTS BS (km)	Niveles de bloqueo (dBm) con una separación de 2.8MHz entre la portadora UMTS y GSM-R
0.0	-41.7
0.1	-42.3
0.2	-43.2
0.3	-40.4
0.4	-38.1
0.6	-38.8
0.8	-39.8
1.0	-41.1
1.1	-42.7
1.2	-42.6
1.4	-43.8
1.6	-45.7
1.8	-47.1
2.2	-50.0
2.4	-50.9
2.5	-51.5
2.6	-52.4

La *figura 13* muestra la variación del nivel de bloqueo del receptor UMTS en función de la distancia entre la BS y MS.

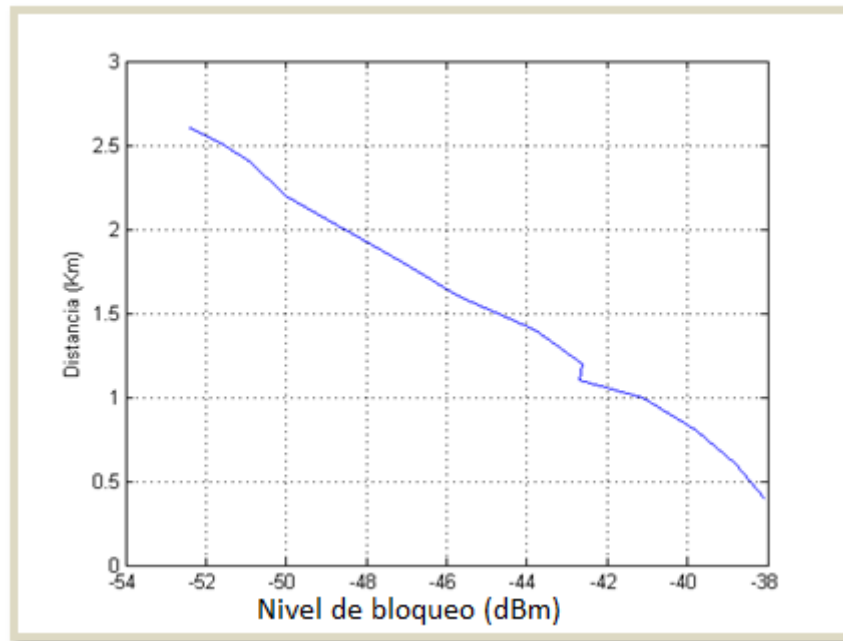


Figura 13 Nivel de bloqueo del receptor UMTS Vs. Distancia entre MS y BS



2.1.6 Interferencias de banda estrecha y banda ancha

Por último, para la misma potencia total recibida de la fuente interferente, la relación C/I debe disminuir con sistemas de banda ancha, ya que los sistemas como UMTS y LTE distribuyen el nivel de potencia por todo el ancho de banda lo que mejora la relación C/I, en las figuras 14 y 15 podemos ver la diferencia entre un sistema GSM y otro de banda ancha.

Potencia recibida

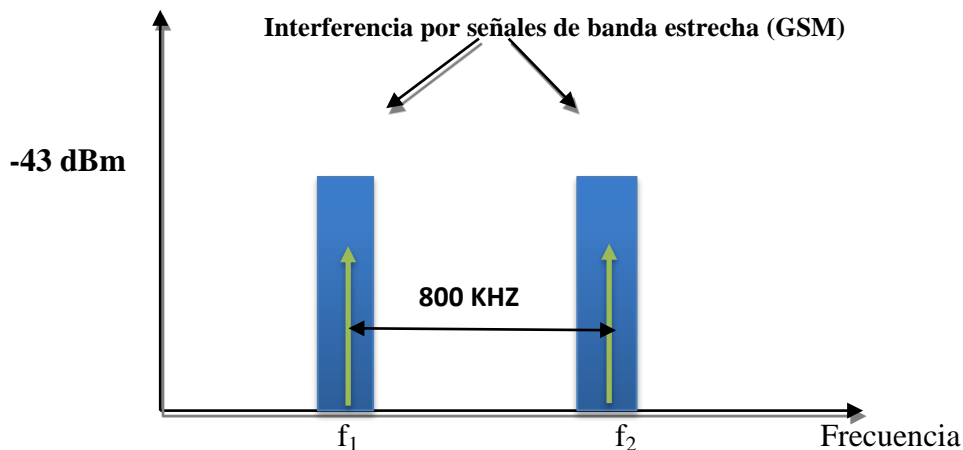


Figura 14 Nivel de potencia para intermodulación Banda estrecha

En este caso el nivel de potencia se distribuye en un ancho de banda pequeño, 200 KHZ, el nivel de la señal es mucho más alta que en el caso mostrado a continuación, figura 15, donde el ancho de banda es mucho mayor lo que hace que el nivel de la señal es mucho más bajo, sin embargo como hemos explicado en apartados anteriores un ancho de banda grande aumenta la probabilidad de intermodulación.

Potencia recibida

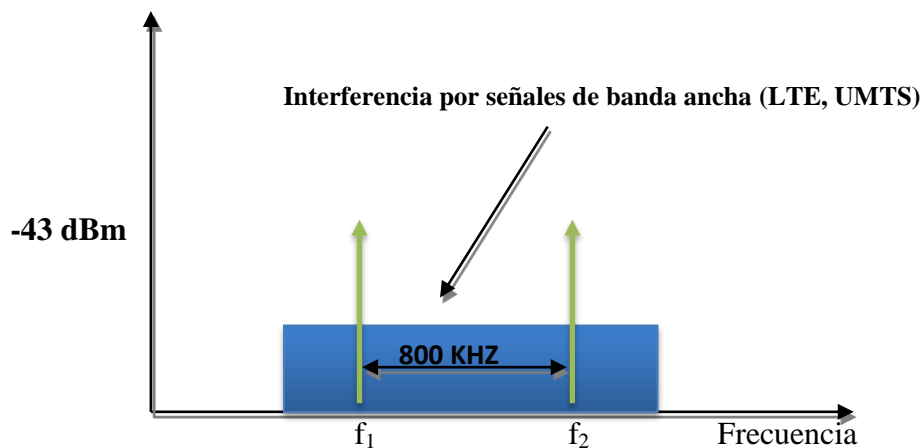


Figura 15 Nivel de potencia para intermodulación Banda ancha



2.2 Características de los transmisores y receptores

Los niveles de interferencias no dependen solo del nivel de la señal emitida, sino también debemos de tener en cuenta las distancias entre la estación base de la red LTE y la estación móvil de la red GSM-R, teóricamente estas emisiones no deseadas suelen ser de dos tipos, espurios y emisiones fuera de banda, por una parte los espurios se pueden evitar poniendo filtros adicionales en la salida del transmisor y/o en la entrada del receptor de la estación móvil GSM-R, en cambio las emisiones OOB, como hemos explicado anteriormente, se generan en la banda de la señal deseada lo que hace imposible su eliminación con filtros. Para desarrollar este tipo de soluciones se debe tener en cuenta la tecnología de los circuitos utilizados, y los parámetros de los mismos como la sensibilidad de los receptores, selectividad, y las características de los amplificadores para reducir el efecto de la intermodulación.

Por otra parte, las antenas utilizadas a la hora de planificar una red LTE y/o GSM-R tienen varios parámetros que podemos controlar para conseguir una red con menor nivel de interferencias posible, algunos de estos parámetros son, el nivel de radiación, la altura de las antenas, si hay visibilidad directa con las estaciones móviles de GSM-R, etc., todos estos parámetros determinan la ganancia de las antenas y por lo tanto el valor de la PIRE que nos da realmente el nivel de potencia que se van a transmitir las estaciones base.

A modo de ejemplo las antenas de las estaciones base pueden ser dirigidas de tal manera que el haz de la antena no golpee la antena de tren ni a otras antenas de las estaciones base vecinas en una distancia corta. Esto aumentará la MCL (pérdida de acoplamiento mínima) y reducirá las emisiones no deseadas y las señales de bloqueo en ambas direcciones. Con estos métodos podemos optimizar una red con interferencias mínimas por lo que podemos bajar los niveles de emisión de la señal GSM-R, manteniendo la relación C/I.

Desde el punto de vista regulador, la ETCS ha definido valores mínimos de cobertura, dejando libertad a la hora de la implementación de ingeniería, lo que dejaba una ejecución no estandarizada en toda Europa, esto obligó a definir una solución Europea amortizada basándose en los requisitos exigidos por la EIRENE que soporta diferentes modelos de ejecución.

Cabe destacar que según la normativa Europea 2009/766/EC [4], los estados miembros del espacio Europeo tienen la obligación de garantizar la protección y la seguridad de las redes GSM-R.

Las normativas Europeas se centraron en dos puntos importantes, que hemos explicado en los apartados anteriores:

- Evitar las emisiones no deseadas, espurios y emisiones OOB.



- Limitar el nivel de señal emitida por las estaciones bases de LTE.

La coordinación es la manera más eficiente para solucionar el problema, que consiste básicamente en coordinar entre las operadoras que están desarrollando la tecnología LTE y los servicios ferroviarios arbitrada por la agencia de reparto de frecuencias lo que convierte realmente a esta solución a una combinación entre coordinación y aplicación de las normativas de la EIRENE, lo que ayuda a hacer una planificación de cobertura de ambos servicios sin alterar la calidad de servicio de las comunicaciones ferroviarias, esta medida suele tener grandes resultados en los países con altos niveles de interferencias entre las redes públicas y GSM-R.

El reporte de la ECC-96 [5] define los límites de emisión para las señales emitidas por el eNodeB de la red LTE, estos límites no son fijos, ya que dependiendo de las características de la zona y las condiciones de los equipos y de las estaciones base tanto de las redes LTE como las de GSM-R estos valores podrán aumentar o disminuir.

A modo de ejemplo [6] para un nivel de señal GSM-R -94 dBm se puede tolerar un nivel máximo de emisión no deseada de -108 dBm, calculado de acuerdo con los principios EIRENE, en este caso, una única estación base LTE que emite una señal en su banda de entre (-35 dBm a -55dBm)⁵ puede causar este nivel de señal no deseado.

2.3 Técnicas para reducir el impacto de las interferencias

Desde el punto de vista de ingeniería se pueden desarrollar varios tipos de soluciones para reducir el impacto de las interferencias, estas mejoras se pueden desarrollar tanto en los circuitos de la red GSM-R como en los de LTE, una solución muy efectiva es la introducción de redundancia o códigos de corrección de error, como el de VITERBÍ, en los mensajes transmitidos por las estaciones GSM-R, esta técnica consiste básicamente en introducir bits adicionales en las tramas de datos GSM-R que puedan ayudar a corregir en tiempo real las tramas en el receptor.

Por otra parte, mejorando los receptores GSM-R con filtros adicionales en su entrada protegiendo la banda del enlace descendente (918-921 MHz), esta técnica además de ofrecer buenos resultados está recomendada por los diferentes estudios europeos, ya que reduce el nivel de las interferencias eliminando los espurios, también con esta misma técnica podemos filtrar la señal transmitida por la estación base LTE, en este caso los filtros deben cubrir la banda del enlace ascendente LTE,

⁵ Son valores de la potencia transmitida restando la atenuación de espacio libre



lo que nos ofrecerá una mejora en la selectividad del canal adyacente (ACS), la desventaja de utilizar los filtros es la adición de ruido y pérdidas de retorno que suelen introducir que reducen ligeramente la zona de cobertura de la estación base, por lo que frente a esta solución se ve la obligación de combinarla con otras mejoras como aumentar las ganancias de las antenas transmisoras o la altura de las mismas, en la *figura 16*, podemos ver como aumenta la ACS proporcionalmente con la ganancia y la altura de las antenas, que equivale a aumentar la PIRE de la señal transmitida.

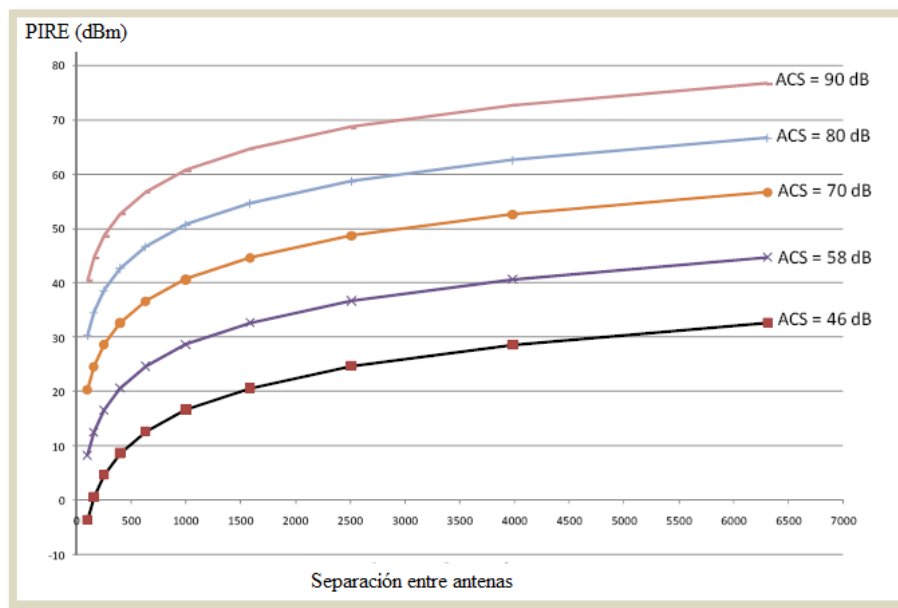


Figura 16 ACS VS separación entre antenas y ganancia

Sin embargo, la técnica del filtrado no es muy efectiva frente a emisiones fuera de banda que se producen por la intermodulación de los amplificadores, ya que estas emisiones OOB se intercalan dentro de la banda de paso como se ha explicado anteriormente lo que disminuye la ACLR.

La diversidad mejora la sensibilidad del receptor y como consecuencia obtendremos una mejor relación portadora-interferencias, C/I, es muy recomendable mantener la sensibilidad del receptor GSM-R en un nivel por debajo de -92 dBm.

Otra solución muy importante, es la que ofrece la técnica CDMA de saltos en frecuencia (FH-CDMA), que consiste en la variación de la portadora a lo largo del tiempo de transmisión, en el caso de una transmisión LTE en zonas cercanas a las estaciones móviles GSM-R el canal de control de difusión (BCCH), siempre intenta asignar las frecuencias más lejos posible de la banda LTE, gracias a esta técnica se consigue compensar el efecto de bloqueo del receptor, y reducir los



desvanecimientos, aunque su aplicación se queda limitada a la disposición de frecuencias en el espectro.

Por otro lado el aumento del número de las estaciones base, aumentara la cobertura de la red GSM-R, lo que mejorara la calidad de servicio (QoS), aunque hay que tener en cuenta que el número de la BS estará limitado en zonas donde hay escases de frecuencias como es el caso de zonas urbanas, con alto tráfico ferroviario.

En los siguientes apartados con el objetivo de ver los efectos de los filtros y la intermodulación de los amplificadores, etc., vamos a presentar medidas y simulaciones que representan la co-existencia entre las redes públicas y la comunicación ferroviarias en la banda de 900 MHz.

2.4 Medidas de interferencias

En este apartado vamos a analizar la información presentada en la referencia [7], este estudio presenta medidas sobre interferencias en redes GSM-R. El estudio está centrado en las interferencias generadas por una portadora UMTS que es equivalente a una portadora LTE de 5MHz de ancho de banda.

El estudio está enfocado en el análisis y medición de las emisiones fuera de banda de una estación base UMTS y ver como se ven afectadas las estaciones móviles GSM-R. Para ello se harán medidas de rendimiento de emisiones GSM-R y UMTS, y se medirá la tasa de error de comunicaciones GSM-R y se comparara con transmisiones GSM-R con interferencias de UMTS, también veremos cómo varia la BER con los niveles de señal de ambos emisiones, GSM-R y UMTS.

Las medidas realizadas siguen la configuración mostrada en la figura 17, como podemos ver se trata de analizar una transmisión GSM-R interferida por una portadora UMTS que están en frecuencias adyacentes y ver cómo afectan al receptor GSM-R.

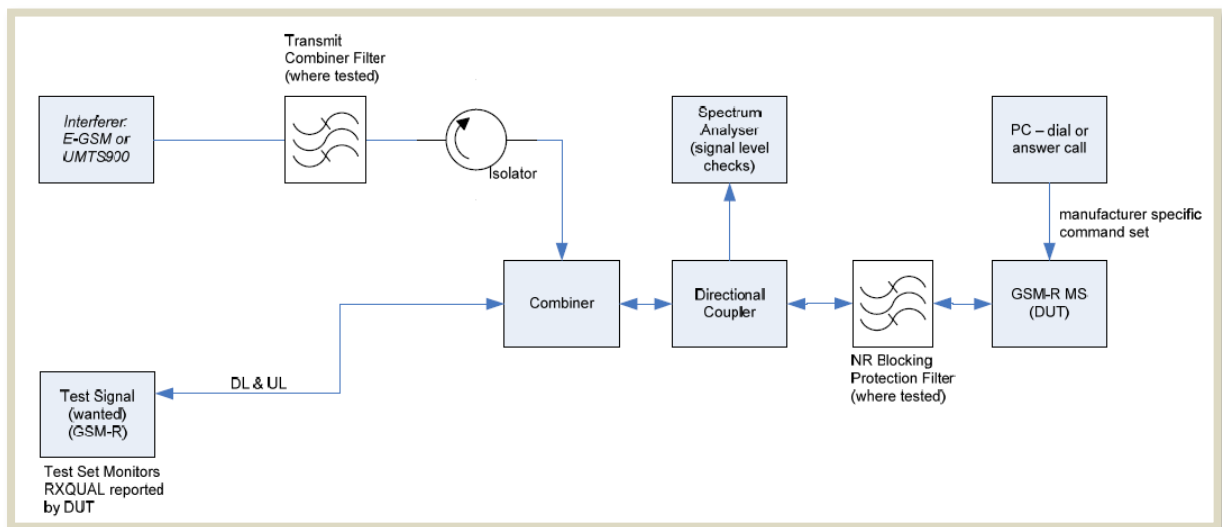


Figura 17 Circuito explicativo de la configuración de las medidas realizadas



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

En la figura 18, mostraremos un ejemplo del espectro de la señal GSM-R que se desea medir su calidad junto a una señal interferente UMTS que está en la banda adyacente.

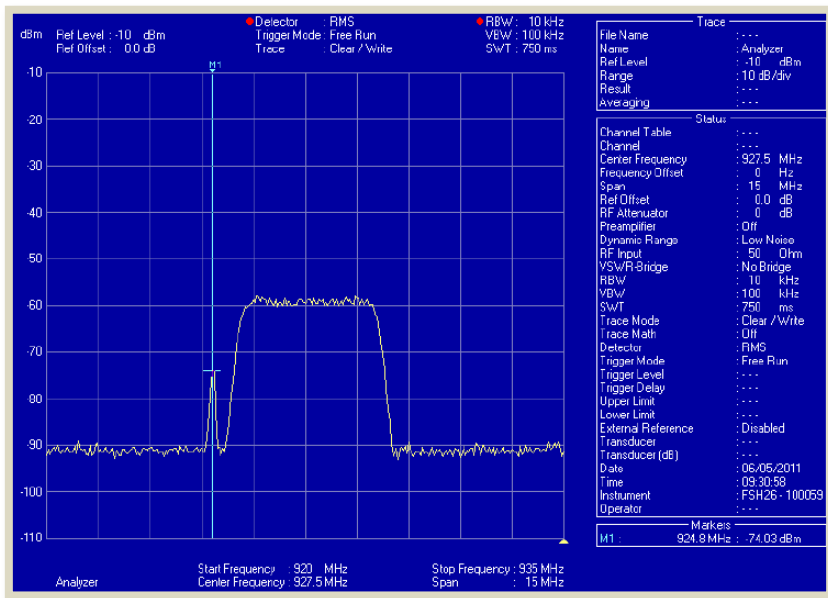


Figura 18 Espectro-Medidas- Interferencias UMTS GSM-R

Para realizar las medidas se han distribuido varios MS GSM-R por una red ferroviaria de prueba, para determinar las características de los equipos utilizados se han sometido a interferencias de banda ancha, UMTS, y banda estrecha, GSM, los niveles de potencia de la señal GSM-R utilizados en estas medidas han sido -108 y -98 dBm dejando una separación entre los bordes de los canales de 200 KHZ, la frecuencia central de la portadora GSM-R es de 924.8 MHz y de las interferentes 925.2 MHz en el caso de GSM mientras que en el caso de UMTS se ha elegido la portadora que está en 927.6 MHz.

Los resultados se presentaran en la tabla 9 para un valor intermedio de RXQUAL⁶ que es una medida de calidad del receptor, que se representa el nivel de señal deseada en función de la señal interferente.

⁶ Esta medida se ha utilizado para determinar la calidad de receptores GSM, el valor de RXQUAL varía entre 0 y 7, siendo 0 la mejor calidad y 7 la peor



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

Tabla 9 Resultados de las medidas de interferencias por GSM y UMTS

Señal deseada GSM-R (dBm)	Tipo de interferencias	Frecuencia interferente	Número de MS GSM-R	Nivel de interferencia (dBm) para RXQUAL = 4
-104	UMTS	927.6	1	-40
-98	UMTS	927.6		-30
-104	GSM	925.2		-48
-98	GSM	925.2		-41
-104	UMTS	927.6	2	-40
-98	UMTS	927.6		-30
-104	GSM	925.2		-51
-98	GSM	925.2		-41
-104	UMTS	927.6	3	-39
-98	UMTS	927.6		-30
-104	GSM	925.2		-50
-98	GSM	925.2		-42
-104	UMTS	927.6	4	-39
-98	UMTS	927.6		-30
-104	GSM	925.2		-50
-98	GSM	925.2		-41
-104	UMTS	927.6	5	-39
-98	UMTS	927.6		-30
-104	GSM	925.2		-50
-98	GSM	925.2		-41

Los resultados obtenidos apenas varían al aumentar el número de MS, como se ve en la *tabla 9* el nivel de interferencias varia con un máximo de 1dB, esto es debido a los niveles bajos de la señal deseada que se han utilizado.

En las simulaciones que vamos a realizar simularemos casos similares, además analizaremos el comportamiento del receptor unos determinados niveles de potencia.

2.5 Conclusión

Por un lado como se ha explicado en los apartados anteriores las interferencias causadas por sistemas de banda estrecha como es el caso de las redes GSM tienen mayor impacto en la redes GSM-R cuando el nivel de potencia es muy alto, en cambio las emisiones UMTS, LTE, tienen mayor probabilidad de producir intermodulación y bloqueo de los receptores GSM-R.

Además, se puede demostrar que en zonas rurales con menor número de BS LTE, las redes públicas, especialmente las de banda ancha, pueden ser interferidas por GSM-R cuando se despliega en la banda adyacente. Como consecuencia, nos lleva al



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

estudio de las dificultades y soluciones que se pueden aplicar con el fin de garantizar la co-existencia entre las redes públicas y GSM-R.

En este proyecto vamos a estudiar el efecto de las interferencias en los diferentes escenarios con el objetivo de llegar a describir técnicas para mejorar la co-existencia entre las redes públicas y GSM-R, y disminuir el efecto de las interferencias. Además vamos a diseñar escenarios preventivos, basados en la coordinación entre ambos redes para reducir el impacto de las interferencias.

Con el objetivo de determinar la ACLR y la C/I necesarios para asegurar una BER mínima para las comunicaciones GSM-R, en el capítulo siguiente vamos a simular varios casos de interferencias, veremos cómo afectan la variación de potencia y la separación entre portadoras a dichas relaciones y en qué casos se puedan co-existir ambas comunicaciones con un número bajo de probabilidad de pérdidas de llamadas.



ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS



CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

- 3.1.Descripción del circuito simulado
- 3.2.Efecto del nivel de potencia
- 3.3.Variación de la separación entre portadoras y el ancho de banda
- 3.4.Efecto de las interferencias de varias portadoras
- 3.5.Efecto de la distancia entre la BS LTE y el receptor GSM-R
- 3.6.Presentación de los resultados



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS



3 SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

Después de explicar el problema que generan las redes públicas especialmente la red LTE, y como se ven afectadas las comunicaciones GSM-R, en este capítulo con la ayuda del programa MICROWAVE OFFICE, empleando el Visual System simulator (VSS), vamos a simular los efectos de las interferencias de los transmisores LTE y ver cómo afecta al receptor GSM-R.

La simulación consistirá en transmitir una señal desde una BS GSM-R, esta señal sufrirá los efectos de la atenuación de espacio libre que se simularán mediante un canal que atenúe dicha señal en función de la distancia que queramos simular, y después haremos llegar esta señal a un amplificador que está justo a la entrada de estación móvil MS GSM-R. A esta transmisión GSM-R, la vamos a interferir emitiendo otra señal de una BS de red pública, LTE, que producirá intermodulación en la señal emitida lo que hará que aparezcan emisiones OOB y espurios.

El objetivo de esta simulación es estudiar el rendimiento del receptor midiendo a su salida la tasa del error de bit, BER, y compararla con la BER de una emisión GSM-R sin interferencias. En la figura 19 mostraremos la curva BER de una transmisor GSM-R que emite una potencia entre 0 y 20 dBm para un canal que atenúa 105 dB, donde podemos ver que para una potencia de 8.7 dBm tenemos una BER de 10^{-3} , este valor de potencia y BER serán los valores óptimos que cogeremos como referencia a la hora de comparar con otras situaciones.

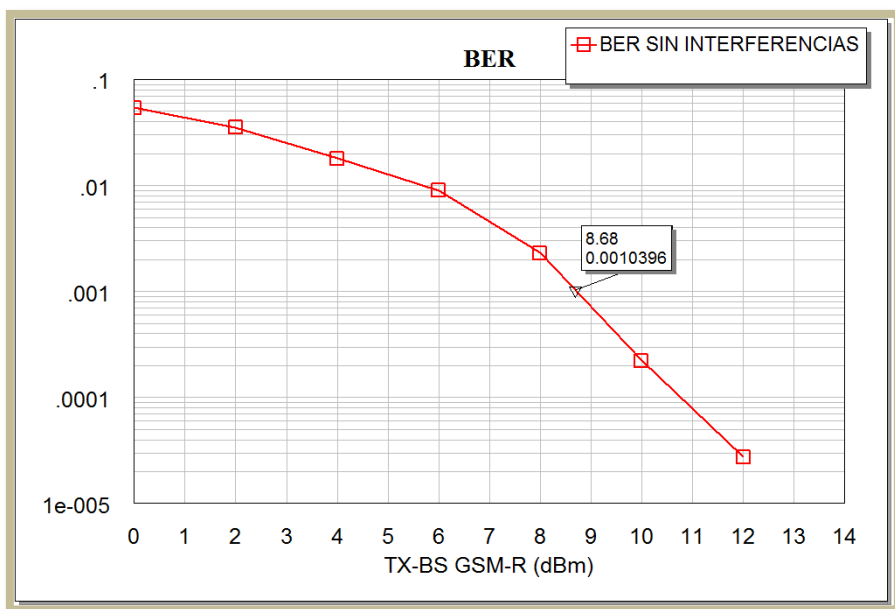


Figura 19 BER de una GSM-R de referencia

En las simulaciones realizadas vamos a medir la diferencia entre esta potencia y la potencia necesaria para obtener el mismo valor de BER.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

Por otra parte veremos cómo se ve afectada la BER cuando se produzca la intermodulación en el amplificador del transmisor LTE como fruto de aumentar la potencia a su entrada. Además veremos cómo varía la ACLR y C/I con los niveles de potencia de la señal deseada y de la señal interferente.

La ACLR es una medida que se realiza para medir el nivel de la intermodulación entre la señal deseada y la interferente en canales adyacentes, en las siguiente simulaciones veremos cómo varía la BER en función de la distancia entre BS y MS de la señal deseada y como varía en función de la ACLR y del nivel de potencia transmitida.

En las simulaciones realizadas vamos a utilizar un amplificador para el receptor GSM-R con las características mostradas en *la tabla 10*.

Tabla 10 Características del amplificador del receptor GSM-R

Ganancia (dB)	15
Figura de ruido (dB)	4
IP3 (dBm)	15
P1DB (dBm)	10

En la *figura 20* mostramos un esquema inicial del circuito que vamos a simular con el AWR, posteriormente añadiremos algunos componentes como filtros, transmisores de banda estrecha, etc., para simular otros efectos que explicaremos más adelante.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

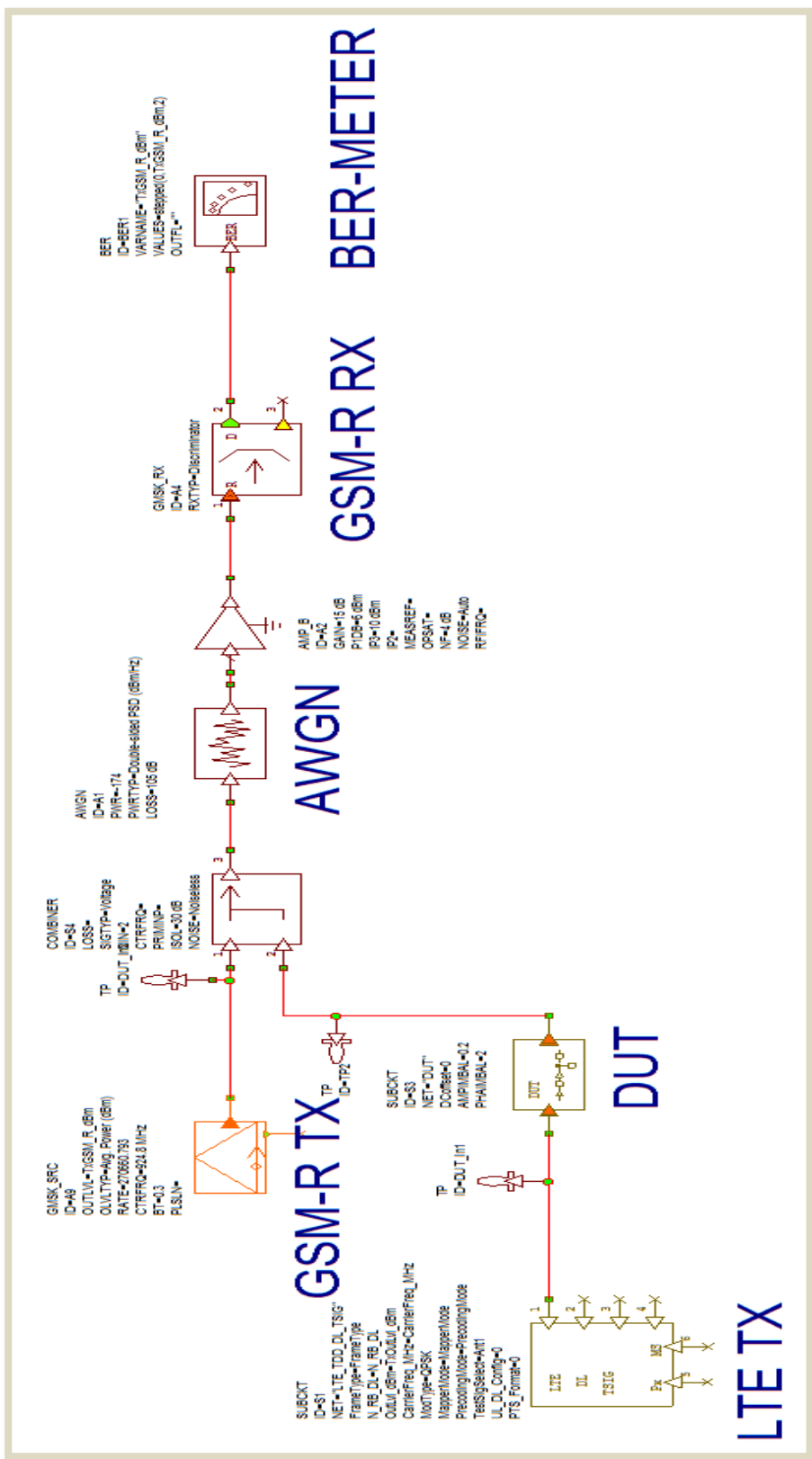


Figura 20 Circuito simulado con el AWR

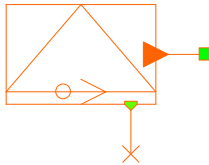


3.1 Descripción del circuito simulado

A continuación detallamos las funciones de los elementos más relevantes del circuito, así como los detalles de los sub-circuitos que contiene.

➤ Transmisor GSM-R

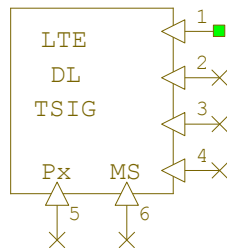
GMSK_SRC
ID=A9
OUTLVL=TxGSM_R_dBm
OLVLTYP=Avg. Power (dBm)
RATE=270660.793
CTRFREQ=924.8 MHz
BT=0.3
PLSLN=



Transmisor GSM-R, genera una onda modulada en GMSK mediante una secuencia aleatoria de bits, en nuestro caso hará la función de la BS GSM-R. Nos permite definir los valores de la potencia transmitida, frecuencia de la portadora, muestras por símbolo, etc.

➤ Transmisor LTE

SUBCKT
ID=S1
NET="LTE_TDD_DL_TSIG"
FrameType=FrameType
N_RB_DL=N_RB_DL
OutLvl_dBm=TxOutLvl_dBm
CarrierFreq_MHz=CarrierFreq_MHz
ModType=QPSK
MapperMode=MapperMode
PrecodingMode=PrecodingMode
TestSigSelect=Ant1
UL_DL_Config=0
PTS_Format=0



Transmisor de la señal de red pública, UMTS y LTE, es la BS de la señal LTE o UMTS que vamos a simular.

Este circuito nos permite variar la modulación eligiendo entre:

- QPSK
- 16-QAM
- 64-QAM

También nos ofrece un ancho de banda de la señal que varía entre 1.4-20 MHz, este circuito es un ejemplo que proporciona el programa AWR para simular una BS LTE, está formado por los elementos que detallados en la figura 21.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

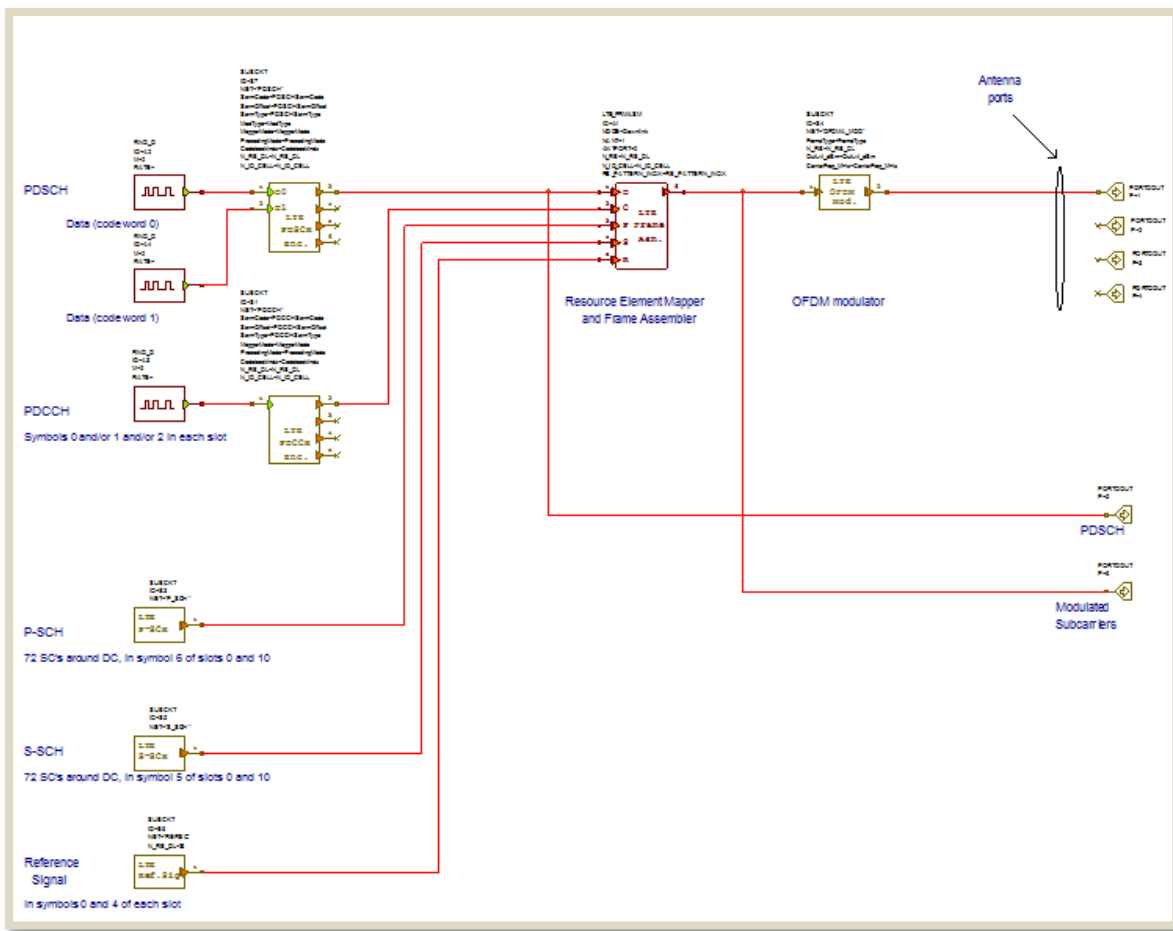
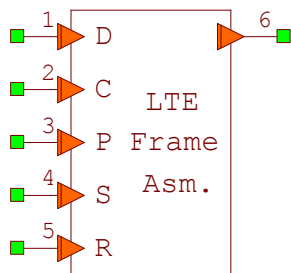


Figura 21 Descripción del Transmisor LTE

Este circuito genera las diferentes tramas LTE, el elemento principal de este circuito es el dominado “LTE FRAME ASM”.

➤ Ensamblador

LTE_FRMASM
ID=A1
MODE=Downlink
NANT=1
ANTPORT=0
N_RB=N_RB_DL
N_ID_CELL=N_ID_CELL
RB_PATTERN_INDX=RB_PATTERN_INDX



Este circuito es un ensamblador del enlace ascendente y descendente del transmisor LTE, combina los paquetes de datos y de control, también se encarga de asignar recursos para la transformación de datos que posteriormente pasaran por el modulador OFDM.



Modulador OFDM

SUBCKT
ID=S4
NET="OFDMA_MOD"
FrameType=FrameType
N_RB=N_RB_DL
OutLvl_dBm=OutLvl_dBm
CarrierFreq_MHz=CarrierFreq_MHz

Este circuito es un modulador OFDM que está formado por el sistema mostrado en la figura 22.

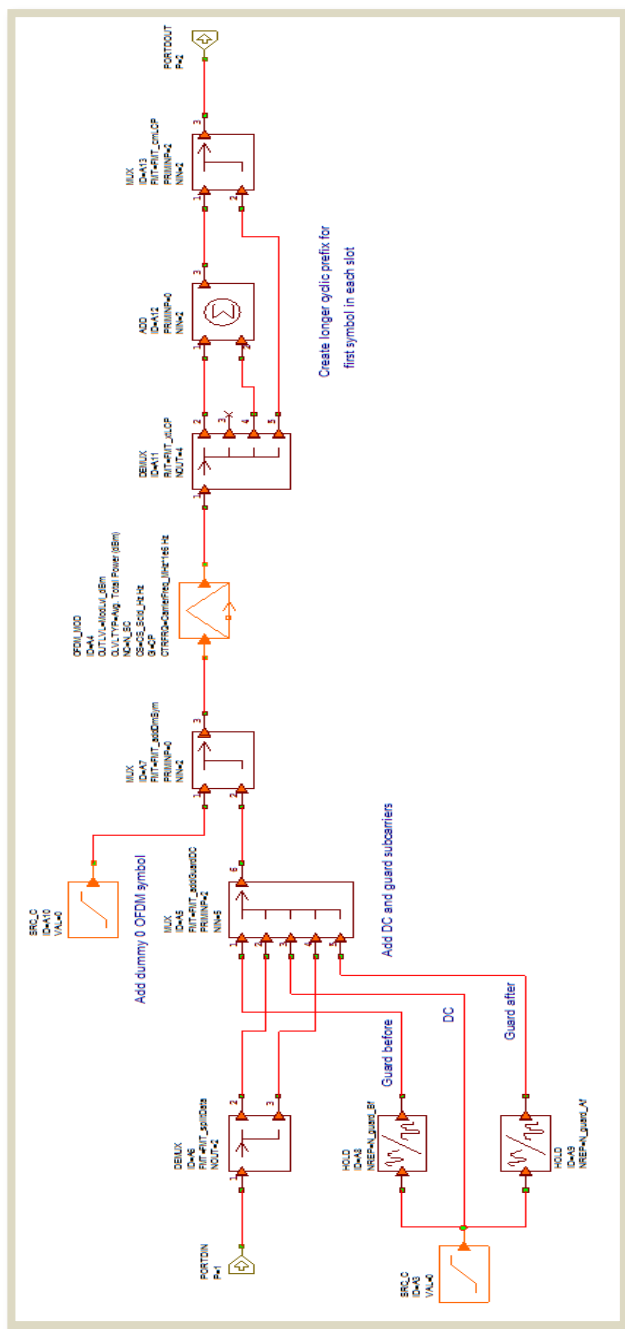


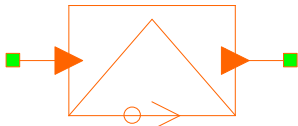
Figura 22 Modulador OFDM



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

OFDM_MOD
ID=A4
OUTLVL=ModLvl_dBm
OLVLTYP=Avg. Total Power (dBm)
NC=N_SC
CS=C \bar{S} _Scld_Hz Hz
GI=CP
CTRFRQ=CarrierFreq_MHz*1e6 Hz

Es un modulador de multiplexación por división de frecuencias ortogonales, transforma una secuencia de símbolos complejos a una onda envolvente multiportadora.



Etapla amplificadora de la transmisión LTE

SUBCKT
ID=S3
NET="DUT"
DCoffset=0
AMPIMBAL=0.2
PHAIMBAL=2

Este circuito hace las funciones de un transmisor, por una parte introduce distorsión a la señal LTE, y por otra parte amplifica la señal generada utilizando para ello un amplificador de banda ancha que introduce intermodulación a la señal interferente, LTE en nuestro caso. En la *tabla 11* se podrán ver las características de dicho amplificador. En la *figura 23* podemos ver los elementos que forman este circuito.

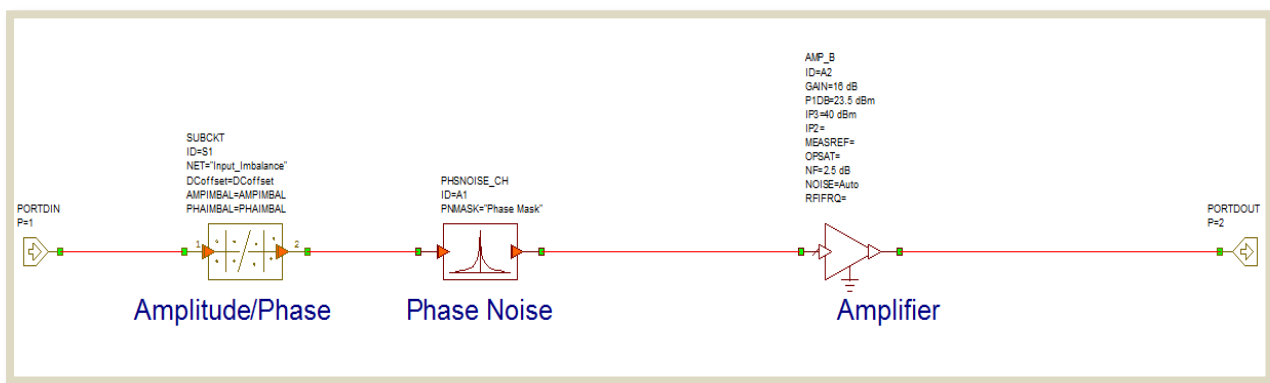
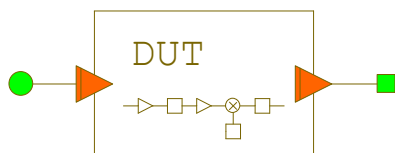


Figura 23 Etapa amplificadora LTE



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

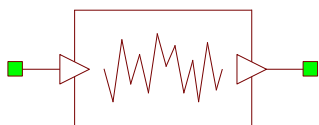
Como se puede ver este circuito está formado por tres elementos, los dos primeros añaden ruido y distorsión a la señal generada para simular el efecto real de una BS, y el tercero es un amplificador no lineal que ajustaremos su características para que se produzca intermodulación para analizar sus efectos sobre las transmisión GSM-R.

Tabla 11 Características del amplificador LTE

Ganancia (dB)	16
Figura de ruido (dB)	2.5
IP3 (dBm)	40
P1DB (dBm)	23.5

➤ Canal de transmisión

AWGN
ID=A1
PWR=-174
PWRTYP=Double-sided PSD (dBm/Hz)
LOSS=105 dB



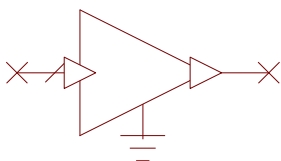
El canal añade ruido blanco gaussiano a las señales deseada e interferente, el parámetro “PWR” representa el nivel de ruido en dB, que como se puede ver lo hemos definido en -174 dB que corresponde al producto de la *constante de Boltzmann* por la temperatura ambiente, 288K, en dB.

El parámetro “loss” define las pérdidas de espacio libre del canal.

➤ Amplificador del receptor GSM-R

AMP_B
ID=A5
GAIN=15 dB
P1DB=6 dBm
IP3=10 dBm
IP2=
MEASREF=
OPSAT=
NF=4 dB
NOISE=Auto
RFIFRQ=

Amplificador del receptor GSM-R, es un modelo no lineal, en la figura podemos ver los parámetros del amplificador utilizado en la simulación, la ganancia de 15 dB es un valor orientativo que hemos utilizado en la simulación ya que en la realidad ese valor puede variar.





Los amplificadores que están a la entrada del receptor típicamente no intermodulan la señal, ya que la señal llega a su entrada sufriendo la atenuación de espacio libre lo que hace que el nivel de potencia no es suficientemente alto para que se produzca intermodulación.

3.2 Efecto del nivel de potencia

El escenario que vamos a simular está mostrado en la figura 24, en este caso la comunicación GSM-R se ve afectada por la interferencia de una portadora LTE, en esta simulación estudiaremos el efecto de la variación del nivel de potencia de la estación base GSM-R, que en realidad equivale a variar la distancia entre la estación base y la estación móvil GSM-R (el tren).



Figura 24 Escenario 1-Separación de 4.6 KM entre BS LTE y MS GSM-R

3.2.1 Variación de potencia sin filtro de entrada del receptor

En este caso las señales emitidas, tanto la deseada como la no deseada llegan a la entrada del receptor sin ninguna protección a su entrada.

Por un lado, la estación base LTE emite una señal de 20 dBm y se encuentra a una distancia de 4.6 Km de una estación móvil GSM-R, por otro lado la estación base GSM-R transmite a una potencia de 0 dBm, dado que en la simulación no podemos variar la distancia entre la estación base y la estación móvil, la simulación consistirá



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

en aumentar el nivel de potencia de la emisión GSM-R, que equivale a reducir la distancia entre ambas estaciones.

En general, el escenario que se quiere representar es el de un tren que está circulando en zona urbana con fuertes interferencias, y observar como mejora la señal GSM-R a medida que el tren se va acercando a una BS GSM-R.

La potencia de la señal LTE que llega al receptor GSM-R será:

$$P_{LTE} = P_{BS-LTE} - A_{el}$$

$$A_{el} = 32.45 + 20 \cdot \log(f[\text{MHZ}]) + 20 \cdot \log(d[\text{KM}])$$

A_{el} , representa la atenuación de espacio libre.

La atenuación entre la BS y la MS para la distancia de 4.6 Km es de 105 dB.

En la *tabla 12* mostramos los parámetros de la simulación que vamos a realizar.

Tabla 12 Parámetros de la simulación Sin filtro a la entrada del receptor

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	5 MHZ	20	927.6	QPSK

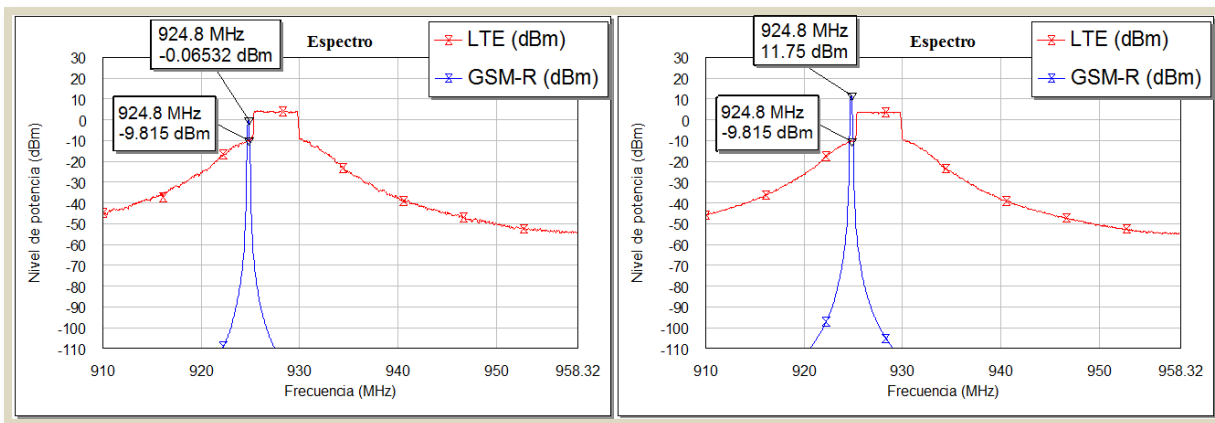


Figura 25 Escenario 1-Espectro de las señales transmitidas

En la *figura 25* se ve el espectro de ambas señales simuladas y sus niveles de potencia, donde podemos observar que para un nivel de potencia aproximadamente de 0 dBm, a la izquierda, la señal GSM-R está prácticamente enmascarada por la emisión LTE, mientras para un nivel de potencia de 12 dBm podemos ver que la



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

relación ACLR llega aproximadamente a 20 dB. En la figura 26 se puede ver el nivel de intermodulación del amplificador de banda ancha, LTE.

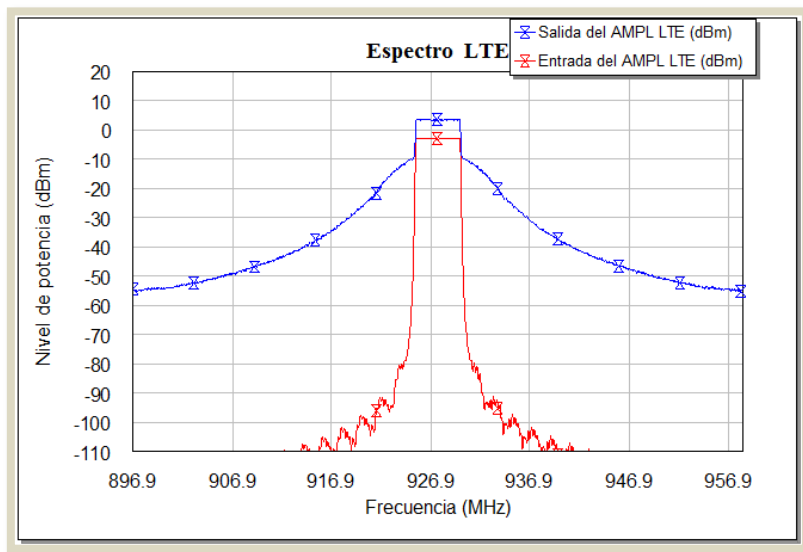


Figura 26 Intermodulación del amplificador LTE. Espectro a la entrada y a la salida.

A medida que aumentamos la potencia de la señal GSM-R, aumenta la ACLR, aun así no conseguimos mejorar la BER, figura 27, la separación entre la curva de referencia está cada vez más grande lo que significa que la transmisión no mejora lo suficiente.

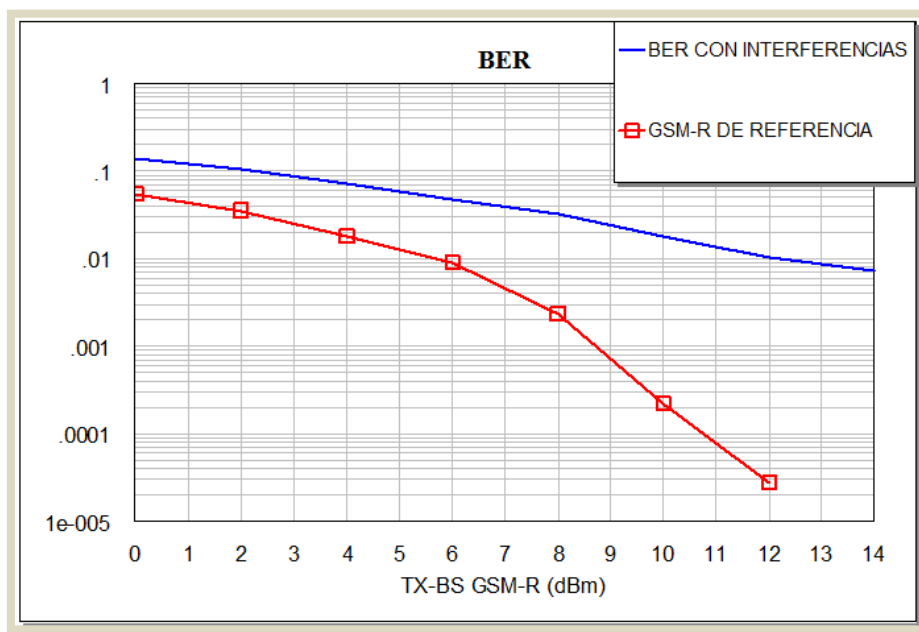


Figura 27 Escenario1-BER Sin filtro de entrada del receptor.

Para la potencia de 8.7 dBm a la que obtenemos una BER de 10^{-3} , vemos que en el caso de las interferencias se obtiene un valor mucho más alto, $3 \cdot 10^{-2}$.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

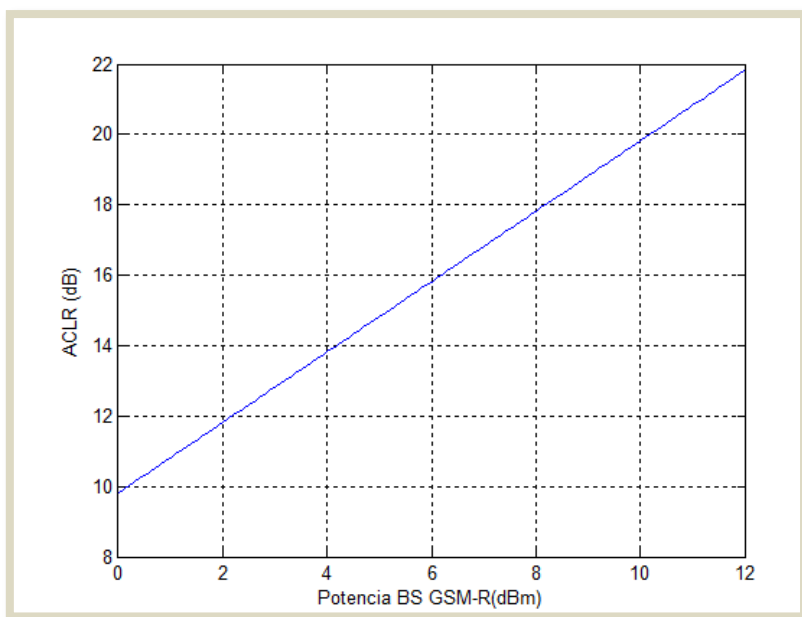


Figura 28 ACLR en función del nivel de potencia de la BS GSM-R

En la figura 28 vemos como aumenta la relación ACLR a medida que aumenta la señal transmitida por la BS GSM-R, por otra parte en la figura 29, vemos como mejora la BER a medida que aumenta la ACLR, sin embargo esta mejora no es suficiente ya que vemos que al aumentar más la ACLR la BER queda prácticamente constante llegando a un valor máximo de $7.2 \cdot 10^{-3}$ para una ACLR de 23.5 dB, que es mayor que la BER de referencia para una potencia de 8.7dBm.

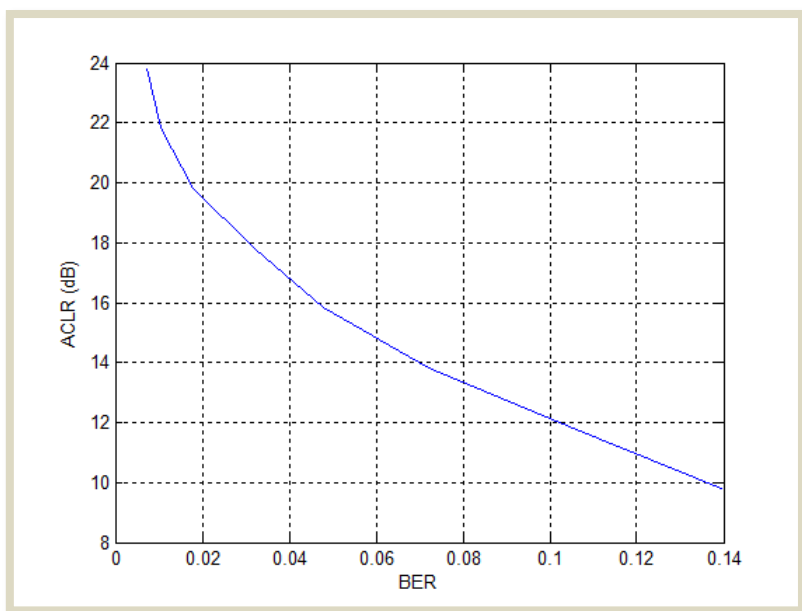


Figura 29 ACLR en función de la BER– Sin filtro de entrada del receptor



3.2.2 Variación de potencia con filtro de entrada del receptor

En este caso vamos a simular el mismo escenario del apartado anterior, poniendo un filtro paso de banda con frecuencia central igual a la de la señal GSM-R transmitida, a la salida del canal, AWGN, en *la tabla 13* podemos ver los parámetros del filtro utilizado.

Tabla 13 Parámetros de la simulación con filtro a la entrada del receptor

Orden	Frecuencias de corte (MHZ)	Frecuencia central (MHZ)	Ancho de banda (MHZ)	Perdidas (dB)
5	924.6-925	924.8	400	0

A continuación, en *la figura 30* podemos ver la respuesta en frecuencia del filtro.

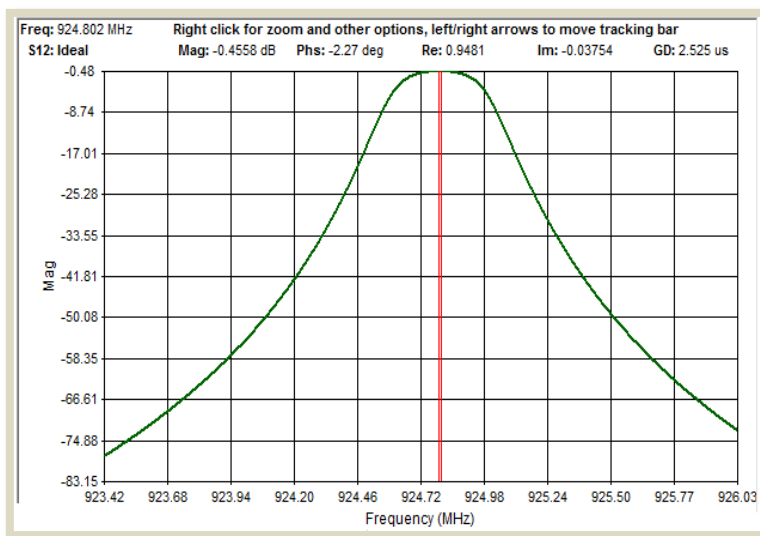


Figura 30 Respuesta en frecuencia del filtro del receptor GSM-R

Como podemos observar en la curva de BER, *figura 31*, el filtro mejora ligeramente la curva de BER para potencias de BS mayores que 12 dBm, sin embargo esta mejora no es suficiente, esto es debido a la intermodulación que se introduce en la banda de paso del filtro lo que hace imposible mejorar la ACLR utilizando filtros.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

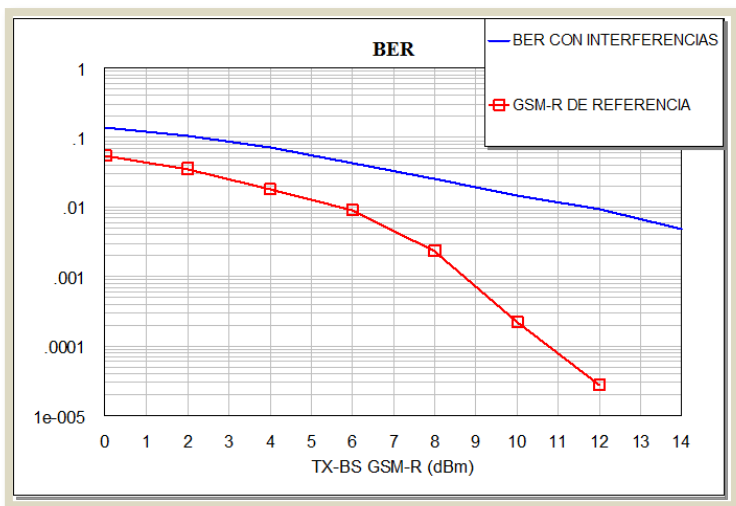


Figura 31 Escenario1-BER con filtro de entrada del receptor

En este caso para una potencia de 8.7 dBm que corresponde a una BER de referencia de 10^{-3} , obtenemos un valor de BER de 0.02.

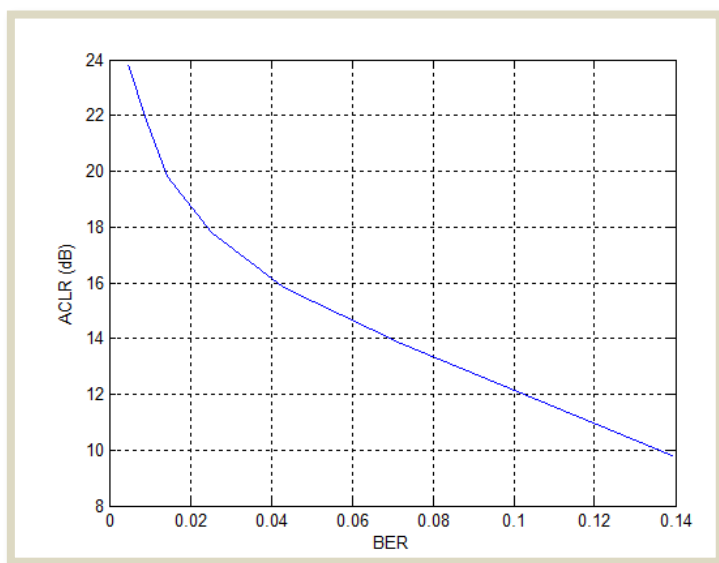


Figura 32 ACLR Vs BER- Con filtro de entrada del receptor

En la figura 32 que muestra la relación entre la ACLR y la BER, podemos ver que el filtro no llega a mejorar confirmando lo que hemos deducido de la gráfica de la BER mostrada en la figura 31. En este caso para una ACLR de 23.5 dB obtenemos una BER de $4.8 \cdot 10^{-3}$ que es menor al valor obtenido sin filtro pero aun así no llega al valor de referencia.



3.3 Variación de la separación entre portadoras y el ancho de banda

3.3.1 Variación del canal

En la siguiente simulación la transmisión LTE se hará en el siguiente canal disponible con un ancho de banda de 5 MHz lo que aumentara la separación entre los bordes de los canales LTE y GSM-R. Teóricamente, el nivel de emisión OOB estará más bajo lo que aumentará la ACLR.

En la *tabla 14*, se puede ver los parámetros de la simulación que vamos a realizar.

Tabla 14 Parámetros de la simulación- canal superior de 5 MHz

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	5 MHZ	20	931.6	QPSK

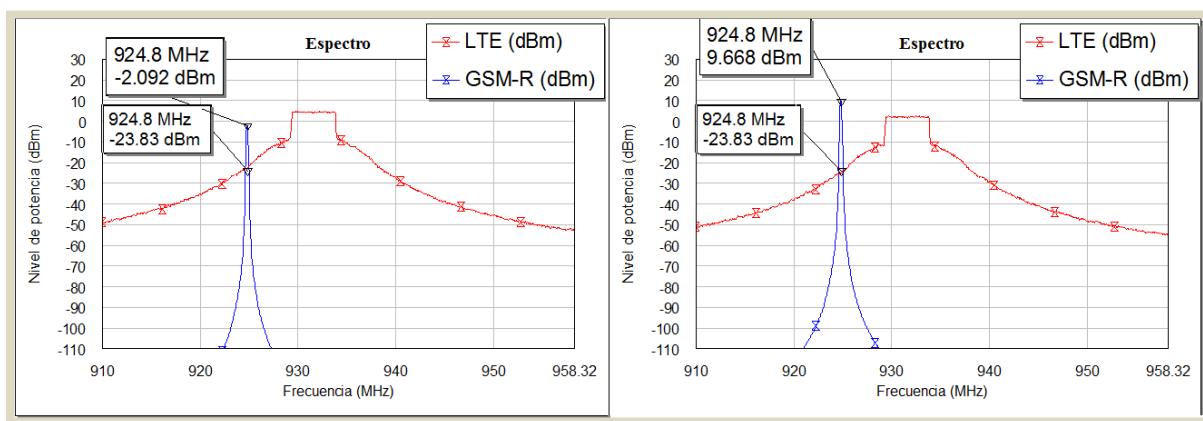


Figura 33 Espectro Canal Superior-separación entre canales de 6.8 MHz

Como se puede observar en la *figura 33* el nivel de la emisión OOB que interfiere al canal GSM-R es mucho más bajo que el caso anterior, en este caso la ACLR es de 25 dB para una emisión de -2 dBm y llega hasta 35 dB para una BS que emite un nivel de potencia de 10 dBm.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

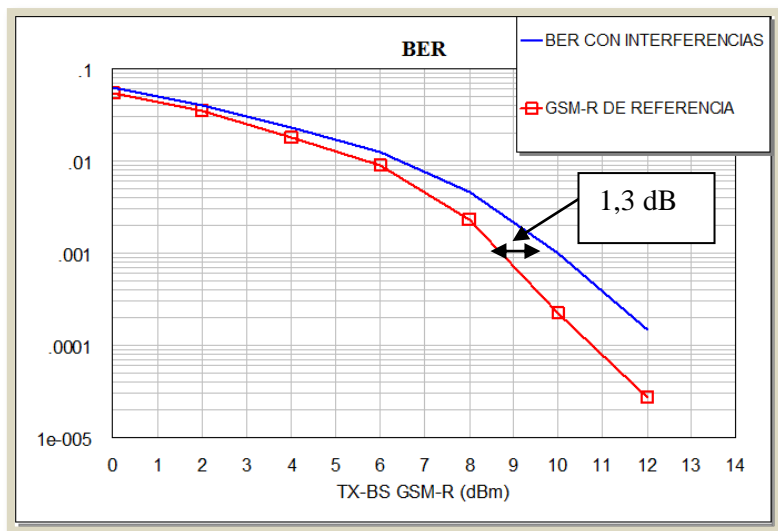


Figura 34 BER Canal superior-separación entre canales de 6.8 MHZ

En la figura 34, podemos apreciar como mejora la BER respecto al caso anterior, como hemos explicado la separación del canal hace que la intermodulación afecta menos a la señal deseada lo que baja la tasa de errores, vemos que obtenemos una BER de 10^{-3} para una potencia de 10 dBm, que supone un aumento de potencia respecto a la potencia a la que obtenemos la misma BER sin interferencias de 1.3 dB.

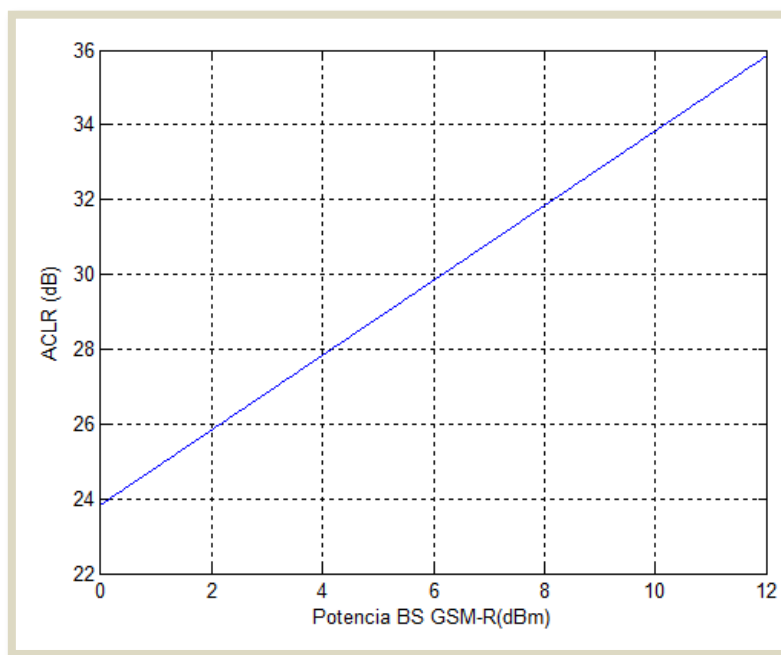


Figura 35 ACLR-separación entre canales de 6.8 MHZ

En la figura 35, vemos como aumenta la ACLR respecto a la potencia transmitida, también podemos ver, figura 36, que en este caso para una ACLR de 31 dB obtenemos una BER de 10^{-2} y para una ACLR de 34 dB obtenemos el valor óptimo de la BER 10^{-3} .

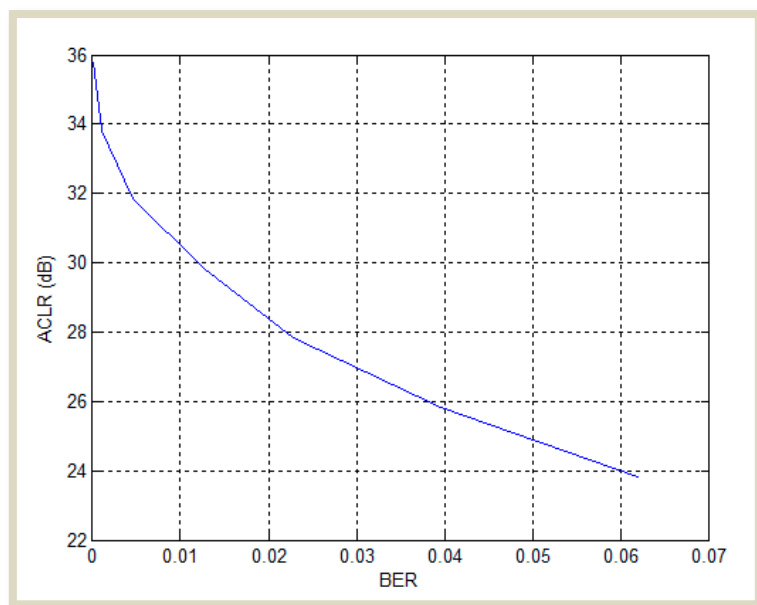


Figura 36 ACLR en función de la BER- separación entre canales de 6.8 MHZ

3.3.2 Variación del ancho de banda

En las simulaciones que vamos a presentar, la señal LTE transmitida tendrá un ancho de banda diferente, veremos cómo varía la ACLR y la BER al aumentar el ancho de banda de la señal interferente, los niveles de potencia tanto de la señal deseada como la de la interferente se mantendrán iguales que el apartado anterior.

3.3.2.1 Ancho de Banda de 10 MHZ

En este caso la señal interferente tendrá un ancho de banda mayor, 10 MHZ, el doble que el caso anterior como se ha explicado en el primer Capítulo, el rango de frecuencias que limita las emisiones fuera de banda llega hasta 2.5 veces el ancho de banda de la señal interferente.

En la tabla 15 podemos ver los diferentes parámetros de la simulación.

Tabla 15 Parámetros de la simulación- canal superior 10MHZ

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	10 MHZ	20	931.6	16-QAM



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

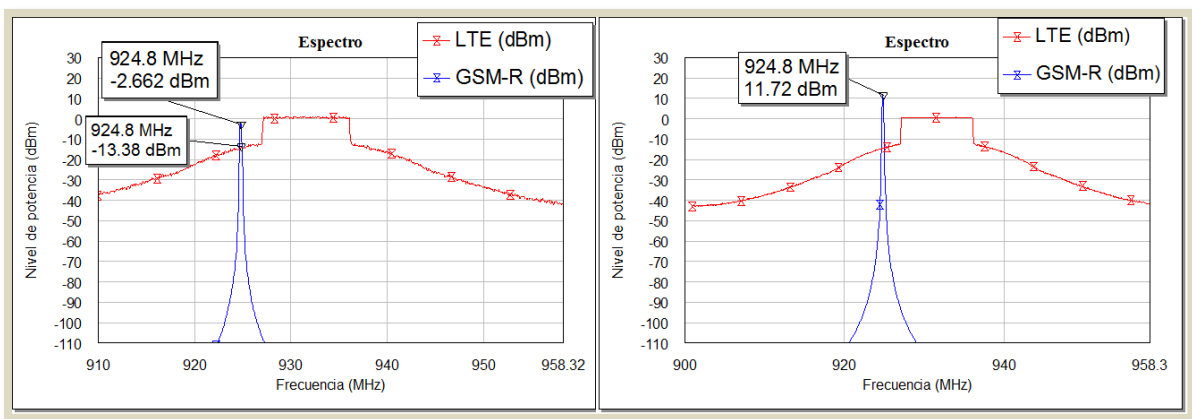


Figura 37 Espectro Canal Superior BW 10 MHZ

En el espectro mostrado en la figura 37 podemos ver la variación de la ACLR, se observa que el nivel de potencia de la señal LTE baja ligeramente, esto es debido a la distribución de potencia por todo el ancho de banda, que en este caso es el doble, lo que mejora la relación señal-interferencias, C/I.

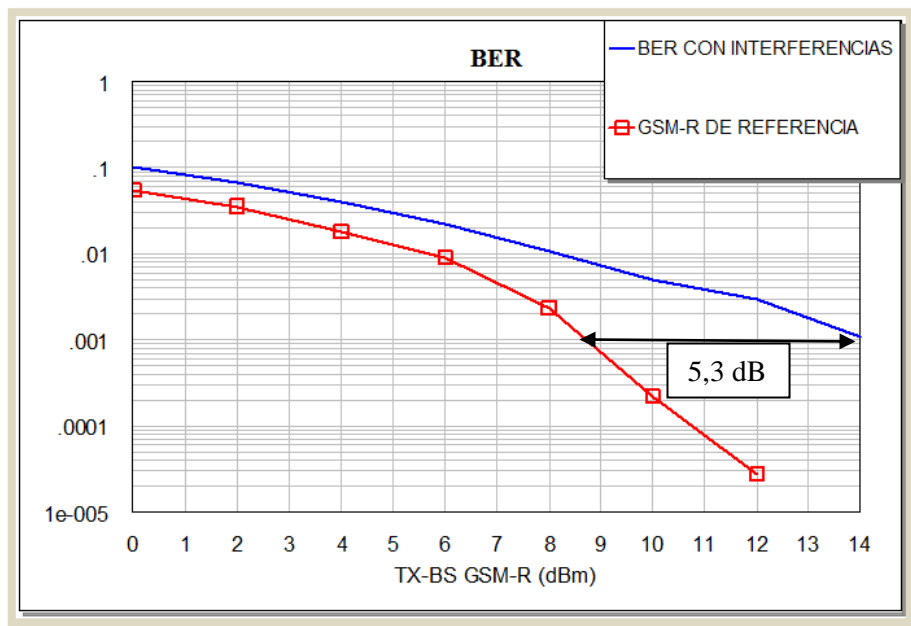


Figura 38 BER Canal superior con ancho de banda de 10 MHZ

En la figura 38, podemos ver que la curva azul que representa la BER con interferencias, es ligeramente mayor que el caso anterior en el que el ancho de banda era de 5 MHz aunque la portadora LTE es la misma para los dos casos 931.6 MHz, la diferencia entre las dos curvas se mantiene constante hasta el nivel de potencia de 7 dBm, a partir de este valor vemos que la BER con interferencias no mejora.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

En este caso el ancho de banda es mayor lo que aumenta el nivel de las emisiones no deseadas, como se ve en la misma grafica obtenemos una BER de 10^{-3} para una potencia 5.3 dB mayor que la de referencia.

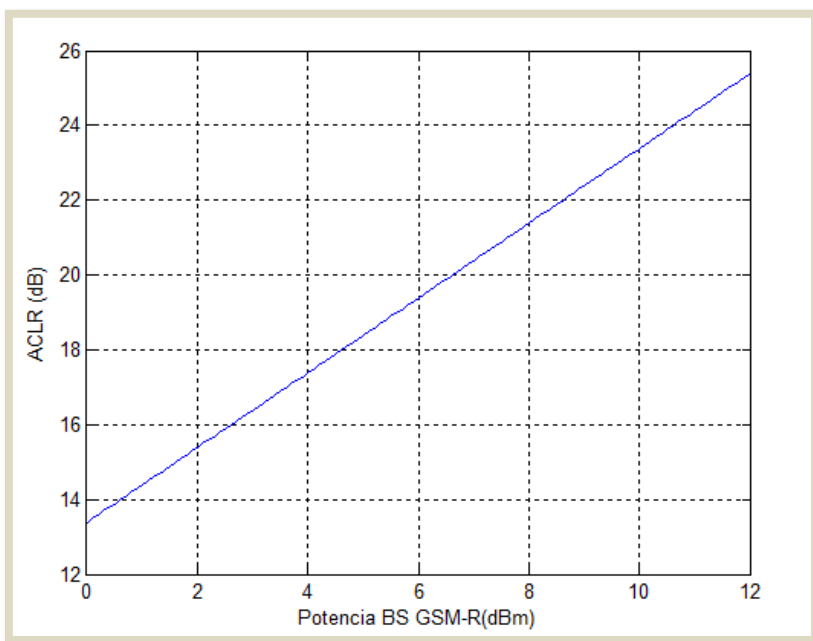


Figura 39 ACLR-Canal superior con un ancho de banda de 10 MHZ

En las curvas de la ACLR, podemos ver que en la figura 39 como baja la relación entre la potencia transmitida y la ACLR.

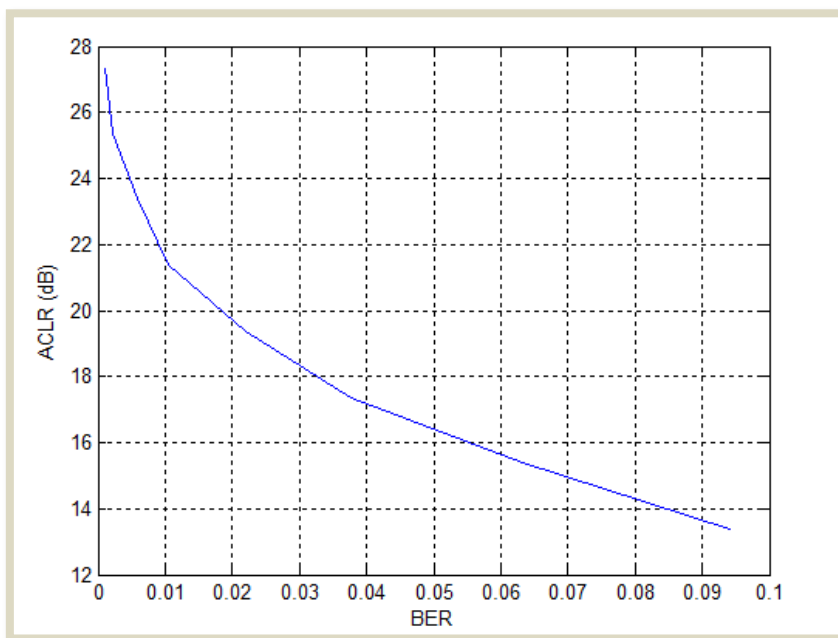


Figura 40 ACL Vs BER Canal superior con un ancho de banda de 10 MHZ



Por otro lado, en la figura 40, podemos ver que para el mismo valor de BER que el caso anterior 10^{-3} necesitamos una ACLR de 27 dB que corresponde a un nivel de potencia de la BS de 14 dBm.

Este nivel de potencia necesario es mayor que el caso anterior pero la ACLR para la que obtenemos la misma BER es 7 dB menor, este es debido a la mejora de la relación C/I.

3.3.2.2 Ancho de banda de 20 MHZ

En este caso la señal interferente tendrá un ancho de banda de 20 MHZ, el doble que el caso anterior, lo que hará que la C/I mejore ligeramente.

En la tabla 16 podemos ver los parámetros de la simulación.

Tabla 16 Parámetros de la simulación- canal superior- 20 MHZ

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	20 MHZ	20	934.8	64-QAM

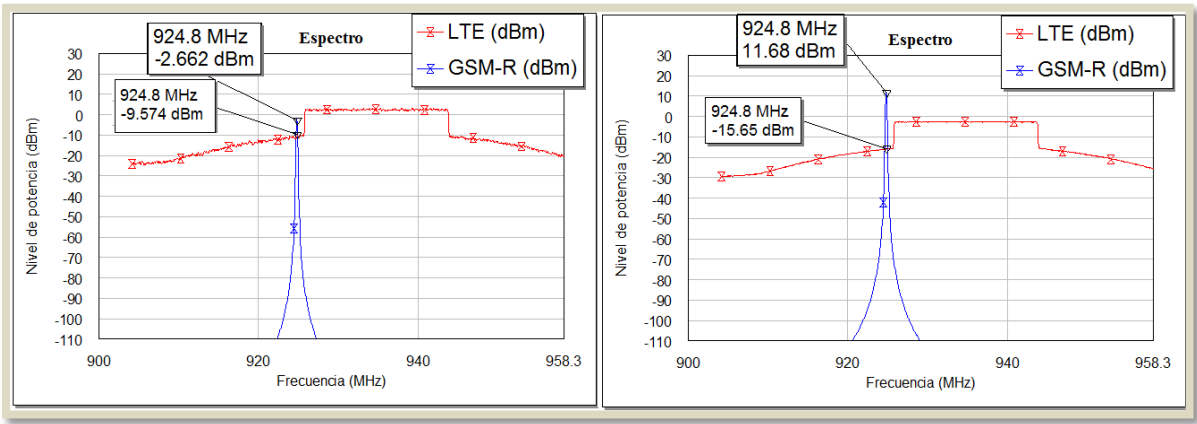


Figura 41 Espectro Canal Superior con ancho de banda de 20 MHZ

En la figura 41, se ve el espectro de las emisiones donde podemos apreciar que el nivel de la emisión no deseada es mayor que en el caso anterior, lo que nos dará una ACLR ligeramente menor.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

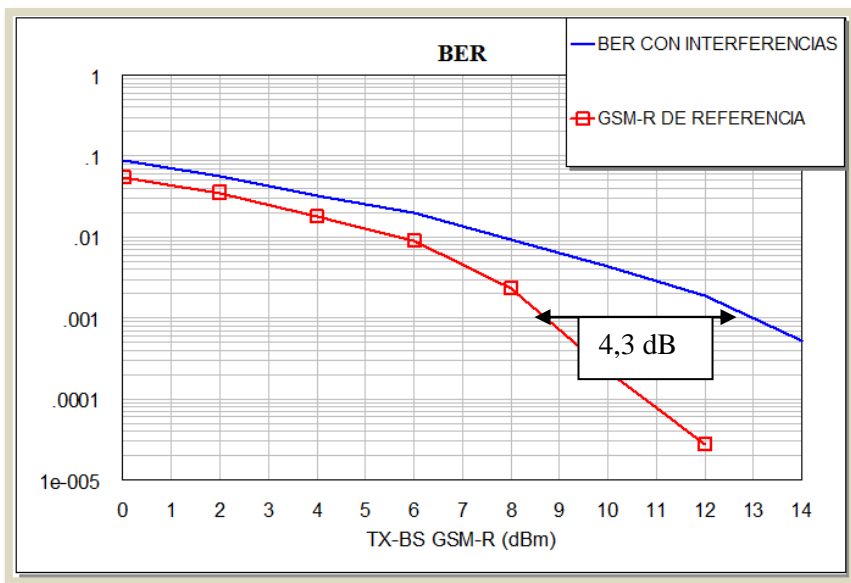


Figura 42 BER canal superior con un ancho de banda de 20 MHz

En la figura 42, se puede ver cómo se va empeorando la curva de BER, en este caso para una potencia transmitida de la BS de 13 dB obtenemos una BER de 10^{-3} , que es 4,3 dB mayor que la de referencia. En este caso se nota una mejora respecto al caso anterior.

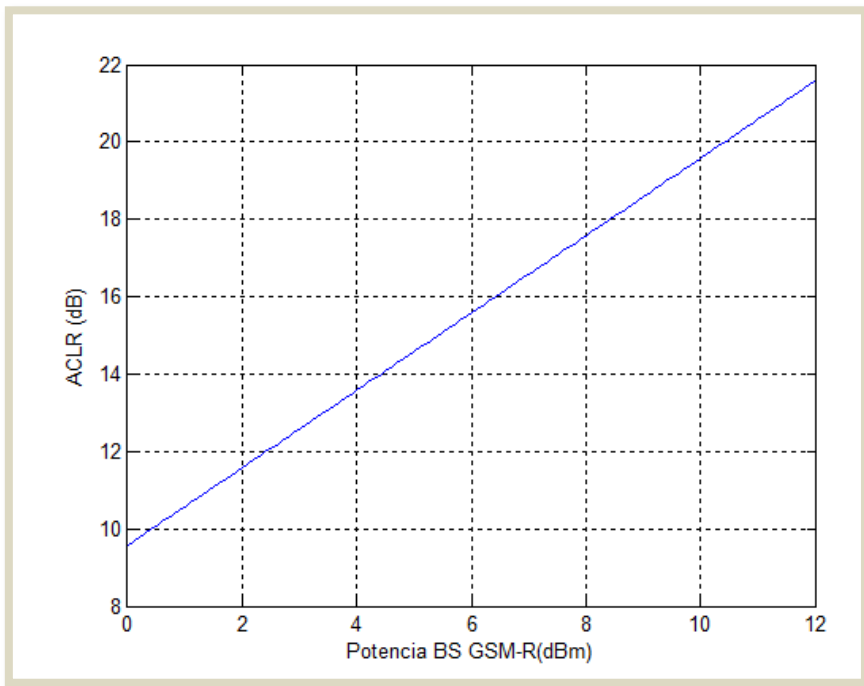


Figura 43 ACLR-Canal superior con ancho de banda de 20 MHz

La relación entre la ACLR y la potencia transmitida por la BS es baja respecto a la señal transmitida con 10 MHz de ancho de banda, en la figura 43, podemos ver que la curva de la ACLR es un poco mejor ya que para los mismos valores de BER se



necesita una ACLR 2 dB menor que el caso anterior, por las mismas razones explicadas anteriormente, como la C/I baja al distribuir la potencia por un ancho de banda mayor en el caso anterior, lo que mejora los valores de la BER en función de la ACLR, *figura 44*.

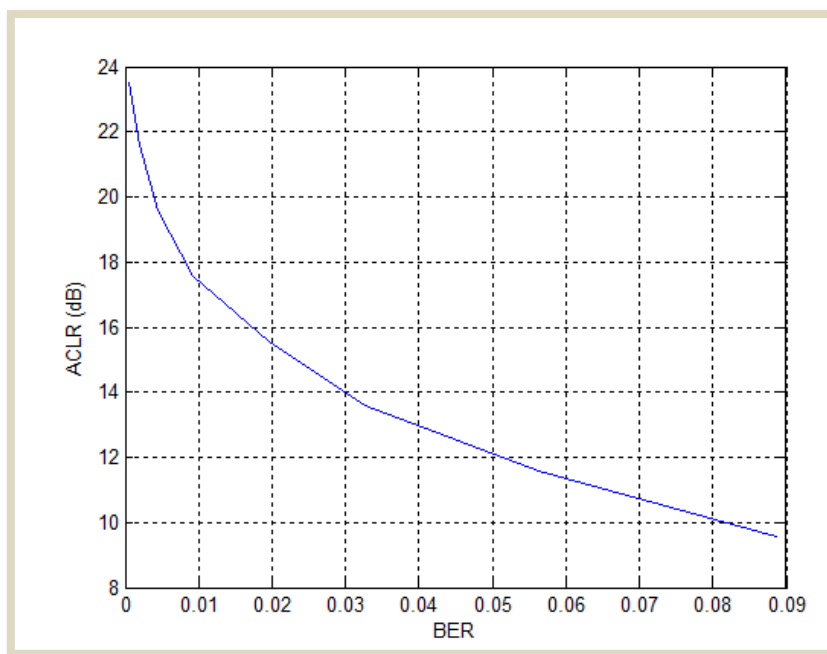


Figura 44 ACLR Vs. BER Canal superior con ancho de banda de 20 MHz

3.4 Efecto de las interferencias de varias portadoras

En este apartado vamos a estudiar el efecto de las interferencias de varias portadoras LTE, y veremos cómo afecta al rendimiento del receptor GSM-R, también simularemos el efecto de las interferencias de banda estrecha, GSM, sobre GSM-R y veremos cómo se verá afectada la relación C/I en estos casos.

3.4.1 Interferencias por dos portadoras

En este caso simularemos el mismo escenario explicado anteriormente con un BS LTE que está a una distancia de 4.6 KM de la MS GSM-R, en este caso la señal GSM-R se verá afectada por dos portadoras de distintos ancho de banda, la separación entre el borde del canal GSM-R y el canal más cercano LTE es de 200 KHZ. En *la tabla 17* podemos ver los parámetros de la simulación.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

Tabla 17 Parámetros de simulación dos portadoras LTE interferentes

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	5 MHZ	20	927.6	QPSK
LTE	20 MHZ	20	939.3	64-QAM

La potencia transmitida por la dos portadoras LTE es la misma, 20dBm, en el espectro, *figura 45*, aparece el nivel de potencia de la portadora de 20 MHZ más bajo por la distribución de potencia por todo el ancho de banda que es 4 veces mayor que el de la otra portadora. Como se puede ver en la misma gráfica el espectro de la señal deseada junto a las dos señales interferentes, la señal más cercana es la que más emisión OOB introduce a la señal deseada.

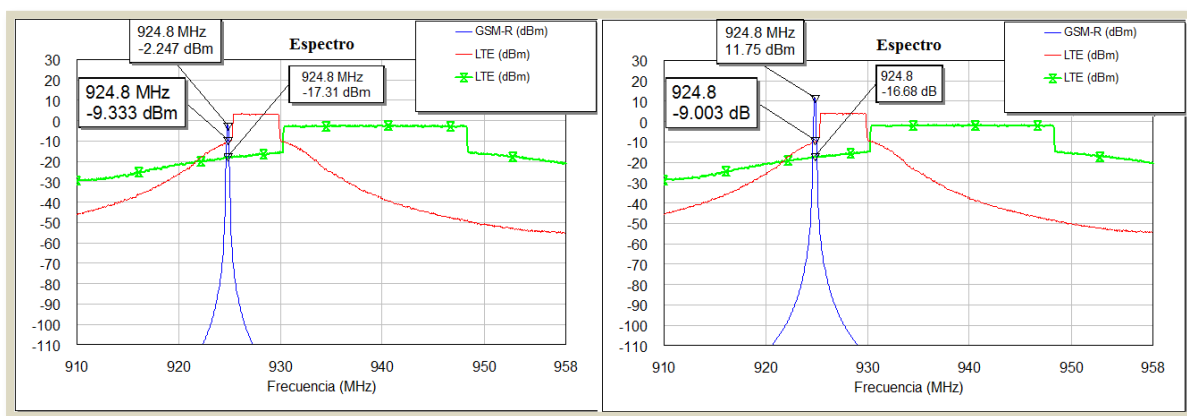


Figura 45 Espectro- Dos portadoras interferentes de ancho de banda de 5 y 20 MHZ

En comparación con la simulación realizada en el punto 3.2.1, donde la señal deseada se veía afectada por las interferencias de una portadora LTE de 5 MHZ, como podemos ver en el resultado de dicha simulación mostrado en *la figura 27*, la curva de BER del resultado obtenido en esta última simulación, *figura 46*, es muy parecido, esto es debido al nivel bajo de la emisión OOB introducido por la señal LTE de 20MHZ por lo que en este caso dominan las interferencias introducidas por la señal LTE de 5 MHZ.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

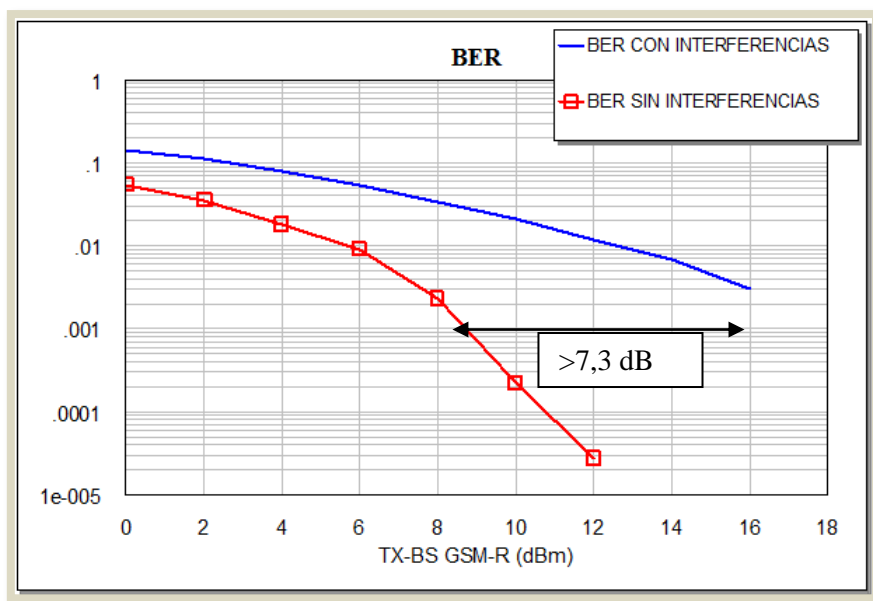


Figura 46 BER-Dos portadoras interferentes de ancho de banda de 5 y 20 MHz

Comparando la misma simulación con el caso anterior, vemos que la diferencia entre la potencia a la que obtenemos un valor de BER de referencia 10^{-3} es mucho mayor en este caso, supera 7.3 dB.

En la figura 47, podemos ver la relación entre la BER y la ACLR de la señal deseada respecto a las emisiones OBB de la señal LTE para ambos ancho de banda.

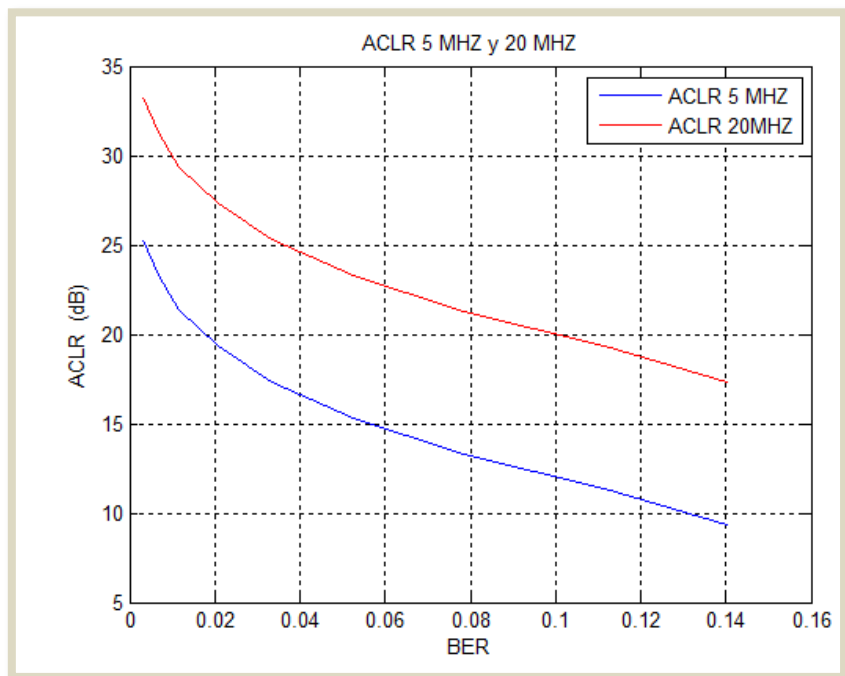


Figura 47 ACLR para anchos de banda de 5 y 20 MHz

Como podemos ver en la gráfica para la misma BER la relación ACLR en el caso de una emisión LTE de 20 MHz de ancho de banda es mucho más grande, en este



caso en especial eso ocurre por la cercanía del canal de 5 MHz a la portadora GSM-R, para una ACLR de 25 dB obtenemos una BER de $3 \cdot 10^{-3}$.

3.4.2 Efecto de las interferencias de banda estrecha

En la simulación que vamos a realizar a continuación, vamos a simular las interferencias por tres servicios distintos uno de ellos es de banda estrecha, GSM, la simulación consistirá en introducir una señal GSM con una separación entre portadoras de 100 KHZ, y al mismo tiempo introducir dos transmisiones de banda ancha, una de UMTS y otra de LTE de 20 MHz de ancho de banda.

En la *tabla 18* se pueden ver los parámetros de las BS que vamos a utilizar en esta simulación.

Tabla 18 Parámetros de simulación- interferencias por GSM, UMTS y LTE

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
GSM	200 KHZ	20	925.4	GSMK
UMTS	5 MHZ	20	927.8	QPSK
LTE	20 MHZ	20	941.2	16-QAM

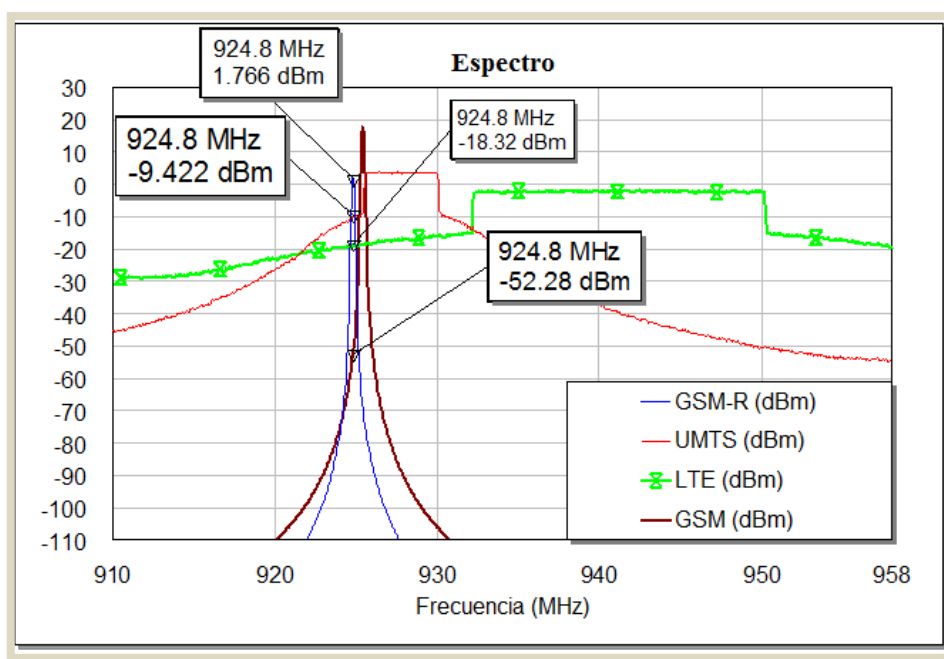


Figura 48 Espectro- Interferencias de varios servicios. GSM, UMTS y LTE



En el espectro mostrado en *la figura 48*, vemos que la ACLR entre la señal deseada y la de GSM es muy alta lo que hace que apenas contribuye en la intermodulación del receptor GSM-R frente a la ACLR de UMTS y LTE, aun así como se puede ver aunque las tres señales interferentes transmiten la misma potencia el pico de la señal GSM es mucho más alto ya que toda la potencia está concentrada en un ancho de banda pequeño, 200 KHZ, lo que perjudica la relación C/I entre la señal deseada y las interferentes.

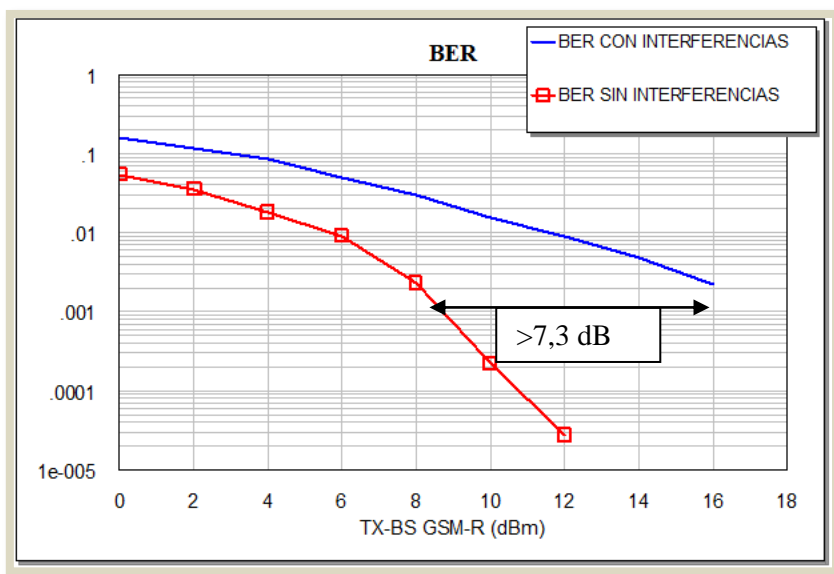


Figura 49 BER - Interferencias de varios servicios. GSM, UMTS y LTE

El fuerte nivel de potencia que introduce la señal GSM apenas afecta a la BER ya que como hemos visto en el espectro el nivel de interferencias que introduce es despreciable respecto a lo que introducen las emisiones de banda ancha, como se puede ver en *la figura 49* para una potencia transmitida de 16 dBm que corresponde a una ACLR 25.4 dB obtenemos una BER de $2.2 \cdot 10^{-3}$.

En este caso los valores de BER son ligeramente menores que el caso anterior, *comparando las figuras 46 y 49*, esto es debido al aumentar la separación entre la portadora GSM-R y la portadora LTE de 5 MHz, y al nivel bajo de las emisiones OOB que introduce la señal GSM.

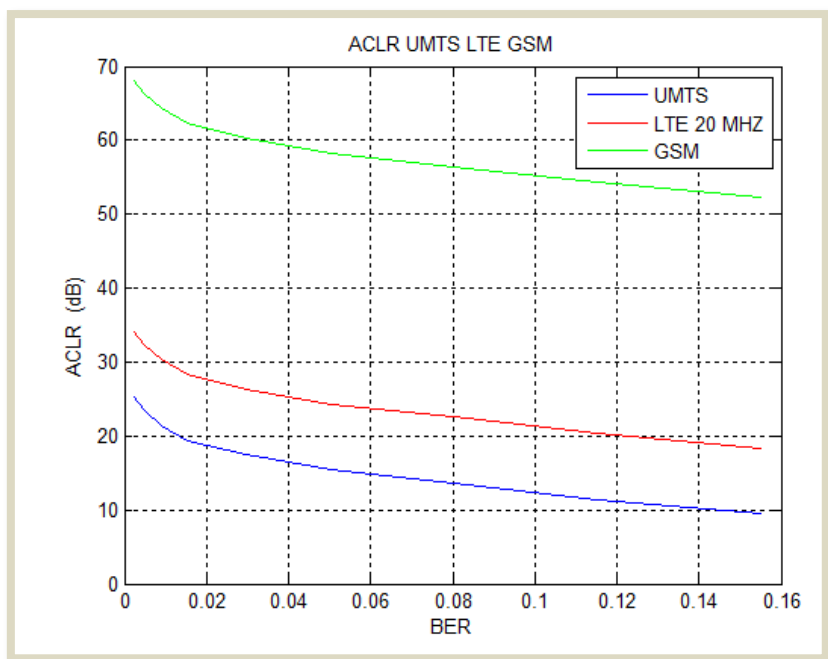


Figura 50 ACLR- GSM, UMTS y LTE.

Comparando al ACLR de las tres comunicaciones, *figura 50*, podemos confirmar lo explicado en los primeros capítulos, las señales de banda estrecha afectan a las comunicaciones en la banda adyacente no por el nivel de emisiones fuera de banda ya que como hemos visto este nivel es muy bajo comparándolo con el nivel que introducen las comunicaciones de banda ancha, sino por el alto nivel de potencia de pico, este problema se puede evitar con el control automático de potencia y con filtros.



3.5 Efecto de la distancia entre la BS LTE y el receptor GSM-R

El escenario 2 que vamos a simular, *figura 51*, representa una situación típica que sufren las comunicaciones GSM-R al pasarse un tren justo al lado de una BS LTE, en las simulaciones realizadas vamos a suponer una distancia de 25 metros entre la BS LTE y el tren, que equivale una atenuación de espacio libre de 60 dB, por otro lado vamos a transmitir una señal GSM-R en las mismas condiciones que la señal LTE transmitida pero con una potencia más baja, debido a que las condiciones del canal a la hora de configurar el simulador deben ser iguales para ambos transmisiones, la potencia baja de la señal GSM-R equivale a transmitir una señal con igual potencia que la BS LTE pero a una distancia más grande.

La potencia que va a transmitir la estación base GSM-R es de -10 dBm y la de BS LTE es de 20 dBm, dado que la atenuación del canal es de 60 dB, en el caso de la señal GSM-R la atenuación total sufrida sería de 90 dB que equivale una distancia de 820 metros. A medida que aumentamos la potencia en la simulación equivaldría a recortar la distancia entre el tren y la BS GSM-R.

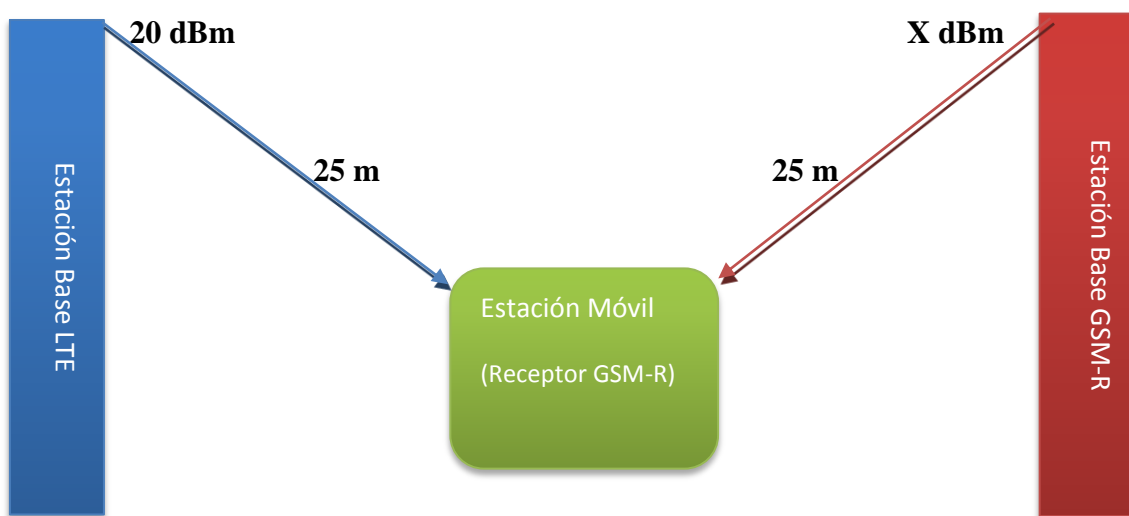


Figura 51 Escenario 2. Separación de 25 metros entre BS LTE y MS GSM-R

Para ver el rendimiento del receptor GSM-R, utilizaremos el mismo método utilizado en el escenario 1, aumentaremos la potencia transmitida por la BS GSM-R, que equivale a recortar la distancia entre la estación base GSM-R y el tren (MS GSM-R).



3.5.1 Efecto de la distancia sin filtro a la entrada del receptor GSM-R

En esta simulación utilizaremos los datos mostrados en *la tabla 19*, que son los mismos datos utilizados en el escenario 1.

Tabla 19 Parámetros de simulación- Distancia entre BS y MS de 25 metros

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	5 MHZ	20	927.6	QPSK

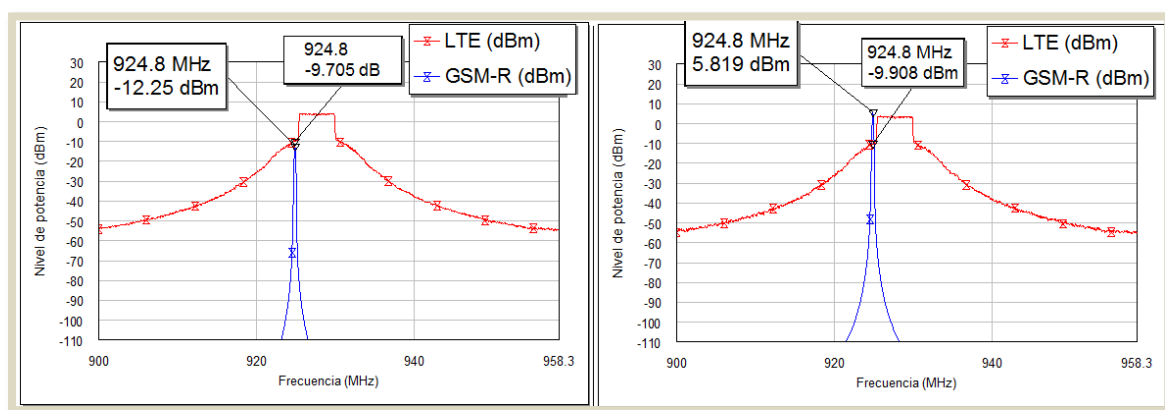


Figura 52 Espectro- señal deseada e interferente con una separación entre BS de 25 m

En *la figura 52* podemos ver que debido al nivel bajo de la señal GSM-R, las emisiones OOB procedentes de la BS LTE llegan a ser más altos que la propia señal deseada lo que nos daría una ACLR negativa de -2.55 dB, a medida que aumentamos la potencia de la transmisión GSM-R (que equivale recortar la distancia entre la MS y la BS GSM-R) vemos que la ACLR llega hasta 15.5 dB.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

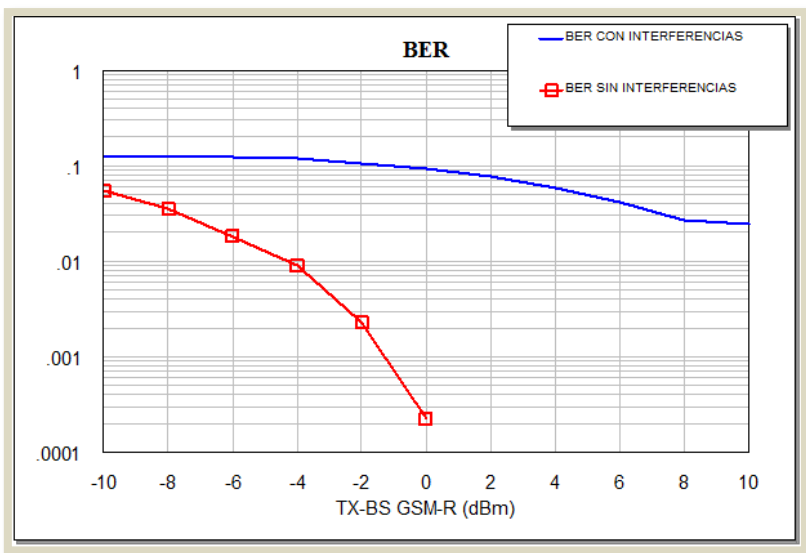


Figura 53 BER- distancia de 25 metros entre la BS y MS, y sin filtro a la entrada del receptor

En la figura 53 observamos que debido a la cercanía de la estación base LTE a la estación móvil GSM-R, el fuerte nivel de interferencias hace que los valores de BER obtenidos son muy altos, en esta situación se perderá totalmente la comunicación GSM-R. En la figura 54, mostrada abajo, podemos ver como varía la BER en función de la ACLR, como se puede ver para variación de la ACLR de casi 18 dB apenas varía la BER teniendo valores de 0.125 y 0.06.

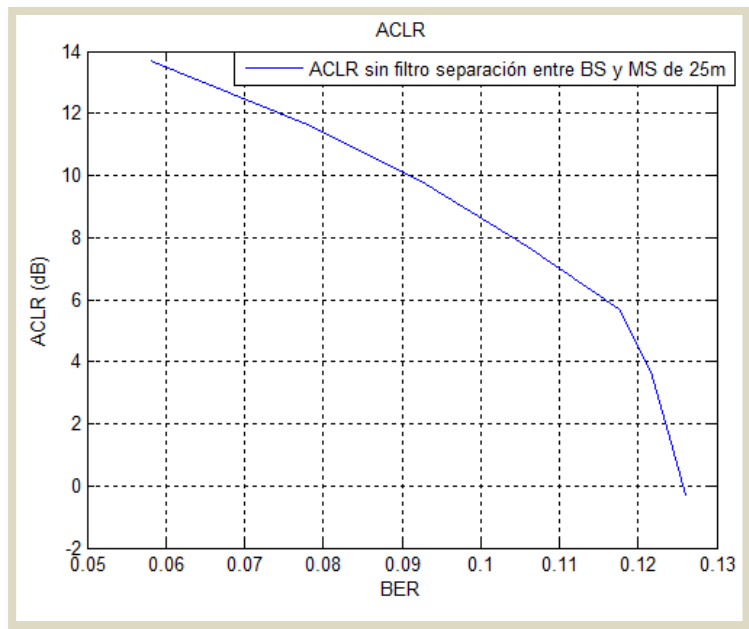


Figura 54 ACLR-Distancia entre la BS y MS 25 m. Sin filtro a la entrada del receptor



3.5.2 Efecto de la distancia con filtro a la entrada del receptor GSM.R

En este apartado vamos a repetir la simulación anterior poniendo un filtro paso banda de 400 KHZ de ancho de banda, el mismo que hemos utilizado en el escenario 1, *figura 30*, para ver el comportamiento del filtro en una distancia corta.

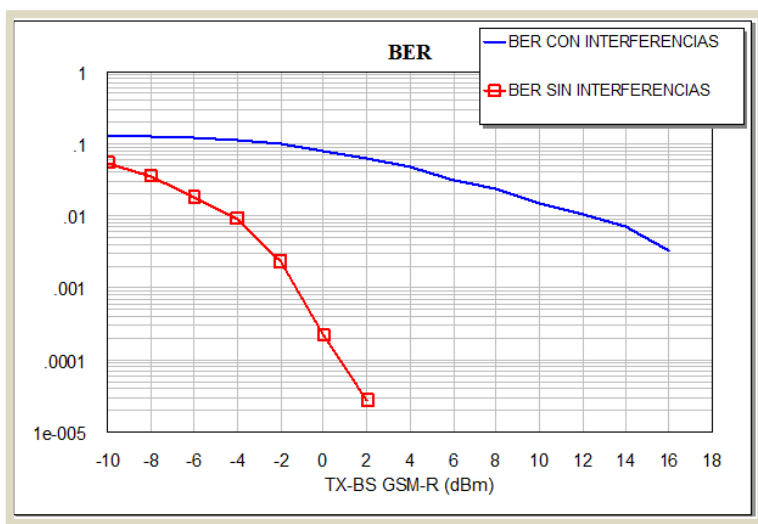


Figura 55 BER- distancia de 25 metros entre la BS y MS, y con filtro a la entrada del receptor

En la *figura 55* vemos que los valores de la BER mejoran ligeramente respecto a los valores obtenidos sin filtro, estas mejoras que son consecuencia de la eliminación de los espurios por el filtro, como hemos explicado en el primer capítulo la emisiones OOB son las que más afectan a la señal deseada por lo que generalmente con el filtro no obtenemos una mejora notable ya que la emisiones OOB no se pueden eliminar con el filtro.

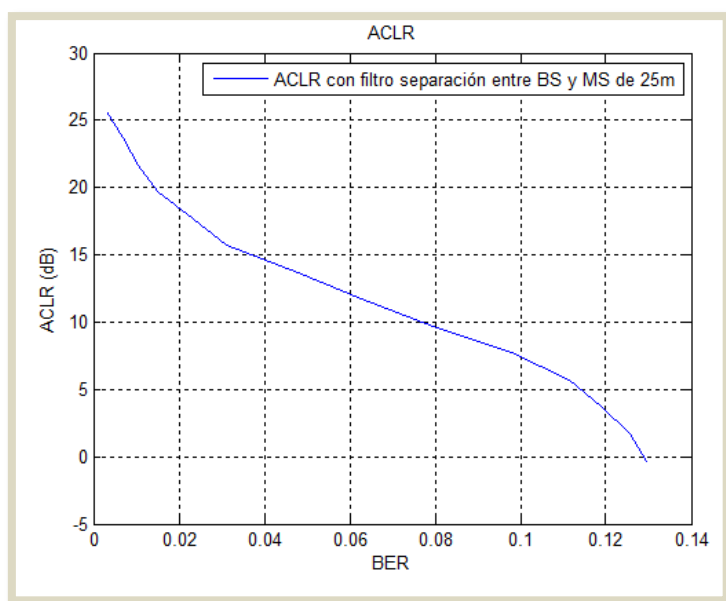


Figura 56 ACLR-Distancia entre la BS y MS 25 m. Con filtro a la entrada del receptor



La curva ACLR mostrada en la figura 56, podemos ver que a medida que aumenta la ACLR no obtenemos valores aceptables de BER, como se puede apreciar en la gráfica para una ACLR de 25 dB obtenemos un valor de BER de $3.2 \cdot 10^{-3}$.

3.5.3 Interferencias por dos portadoras LTE a una distancia corta

En este caso la señal deseada sufrirá interferencias procedentes de dos portadoras LTE de distintos ancho de banda, la separación entre el borde del canal GSM-R y el canal más cercano LTE es de 200 KHZ. En la tabla 20 podemos ver los parámetros de la simulación.

Tabla 20 Parámetros de simulación. Interferencia por 2 portadoras-Escenario 2

Emisión	Ancho de banda	Potencia BS (dBm)	Frecuencia central (MHZ)	Modulación
GSM-R	200 KHZ	0	924.8	GMSK
LTE	5 MHZ	20	927.6	QPSK
LTE	20 MHZ	20	939.3	64-QAM

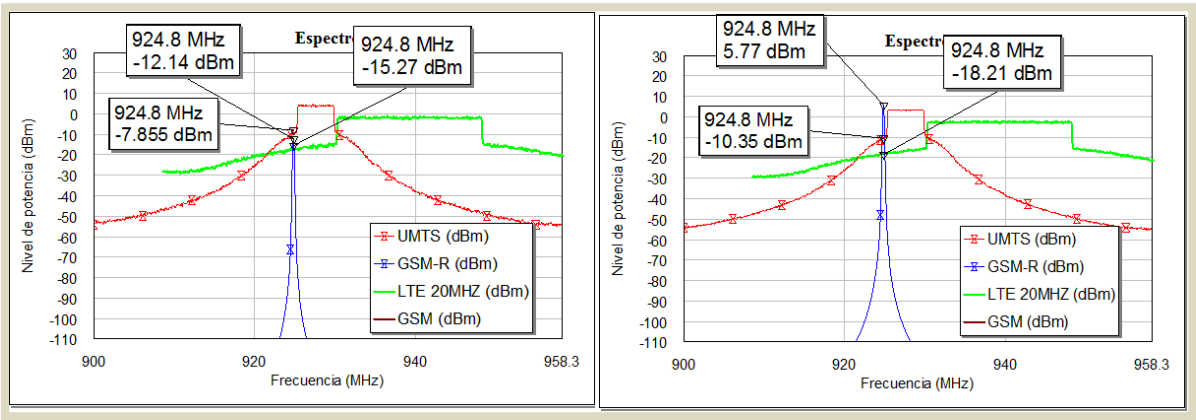


Figura 57 Espectro- Dos señales interferentes a una distancia de 25 m al MS GSM-R

En el espectro mostrado en la figura 57, podemos ver como varía la ACLR entre -4 y 16 dB, en el primer caso apreciamos que la señal deseada está totalmente enmascarada con la emisión fuera de banda procedente de la señal de la banda adyacente lo que hace imposible su demodulación por el receptor GSM-R.

En este caso podemos ver en la curva de BER obtenida, figura 58, que los valores obtenidos son aún más altos que los obtenidos en el caso anterior, debido a las interferencias por las dos portadoras que prácticamente enmascaran la señal deseada, se puede ver que para una variación de potencia de 14 dB la BER prácticamente se mantiene constante.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

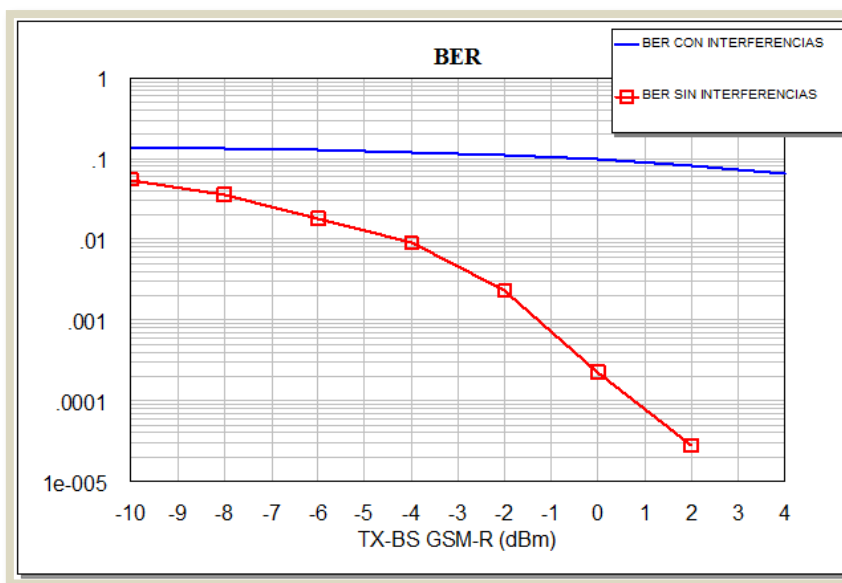


Figura 58 BER- distancia de 25 metros entre la BS y MS, Interferencias por dos portadoras

En la figura 59 donde aparece la ACLR para los dos anchos de banda podemos ver como dicha relación no mejora la BER ya que esta última se mantiene prácticamente constante.

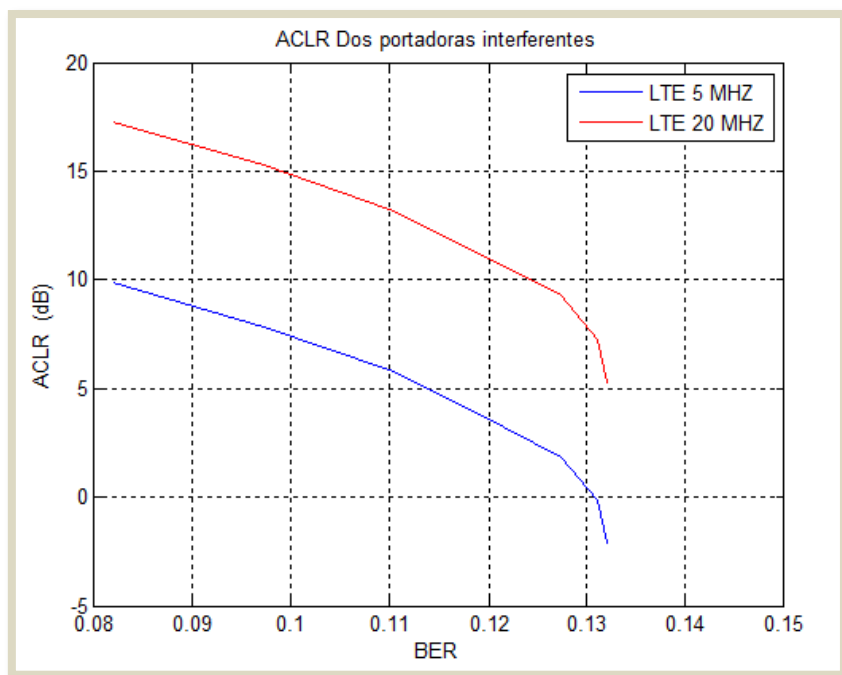


Figura 59 ACLR- interferencias por dos portadoras a una distancia de 25 m a la MS



3.6 Presentación de los resultados

En este apartado presentaremos algunas tablas con los diferentes resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas en este proyecto.

Tabla 21 Resultados- Efecto del filtro-BER con interferencias

Separación entre portadoras (MHZ)	Separación entre BS LTE y MS GSM-R	BER de referencia	Potencia de referencia (dBm)	BER con interferencias	Observación
2.8	4.6 Km	10^{-3}	8.7	0.032	Sin filtro
2.8	4.6 Km	10^{-3}	8.7	0.02	Con filtro
2.8	25 m	10^{-3}	8.7	> 0.1	Sin filtro
2.8	25 m	10^{-3}	8.7	> 0.1	Con filtro

Tabla 22 Resultados- Efecto del filtro-ACLR-BW de la señal interferente de 5 MHZ

Separación entre portadoras (MHZ)	Distancia entre BS LTE y MS GSM-R	BER	ACLR (dB)	Observación
2.8	4.6 Km	$7.2 \cdot 10^{-3}$	23.5	Sin filtro
2.8	4.6 Km	$4.8 \cdot 10^{-3}$	23.5	Con filtro
2.8	25 m	$5.8 \cdot 10^{-2}$	15.7	Sin filtro
2.8	25 m	$3.2 \cdot 10^{-3}$	25.5	Con filtro

Tabla 23 Resultados- Separación entre portadoras y ancho de banda

Separación entre portadoras (MHZ)	Ancho de banda de la señal interferente (MHZ)	Distancia entre BS LTE y MS GSM-R	ACLR (dB)	BER*	GAP entre potencias ⁷ (dB)
2.8	5	4.6 Km	23.5	$7.2 \cdot 10^{-3}$	$>>$
2.8	5	25 m	15.7	0.058	$>>$
6.8	5	4.6 Km	34	10^{-3}	1.3
6.8	10	4.6 Km	27	10^{-3}	5.3
10	20	4.6 Km	25	10^{-3}	4.3

*Consideramos un valor óptimo de BER de 10^{-3} , en los casos que no llegamos a este valor, cogeremos el valor más cercano.

⁷ Es la diferencia entre la potencia a la que obtenemos un valor BER de 10^{-3} sin interferencias y la potencia a la que obtenemos el mismo BER con interferencias.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS

Tabla 24 Resultados- Banda estrecha

Separación** entre portadoras (MHZ)	Número de portadoras interferentes	Ancho de banda de las señales interferentes (MHZ)			BER	ACLR (dB)	GAP entre potencias (dB)
2.8	2	5	20		$3 \cdot 10^{-3}$	20	> 7.3
0.6	3	0.6	5	20	$2.2 \cdot 10^{-3}$	25.4	> 7.3

**Separación entre el canal GSM-R y el canal interferente más cercano

Tabla 25 Resultados-Variación de la BER en función de la distancia

Número de portadoras interferentes	Distancia entre BS LTE y MS GSM- R	ACLR (dB)	BER
1	4.6 Km	23.5	$7.2 \cdot 10^{-3}$
1	4.6 Km	25	10^{-3}
2	4.6 Km	25	$3 \cdot 10^{-3}$
3*	4.6 Km	25.4	$2.2 \cdot 10^{-3}$
1	25 m	15.7	0.058
2	25 m	> 20	> 0.1

*Una de las interferentes es de banda estrecha.



SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS INTERFERENCIAS



CAPÍTULO 4

CONCLUSIÓN



CONCLUSIÓN



4 CONCLUSIÓN

La co-existencia entre las comunicaciones GSM-R y LTE es una necesidad, actualmente la evolución de las tecnologías y la exigencia cada vez más de velocidades binarias más altas y las dificultades de implementar la red LTE en bandas de frecuencias altas como la banda de 2600 MHZ, obligan a la implementación de dichos servicios en la banda 900 MHZ, cercana de la comunicaciones GSM-R, lo que ocasiona interferencias entre ambos servicios siendo la comunicación GSM-R la más perjudicada por el gran ancho de banda de la red LTE. Para reducir el impacto de las interferencias procedente de la BS de redes públicas, especialmente de LTE, primero se debe estudiar el origen del problema y evaluar el rendimiento de las comunicaciones GSM-R frente a varios tipos de interferencias.

Las interferencias provienen de emisiones no deseadas que se dividen en dos tipos, por un lado están las emisiones fuera de banda que se producen por las características no lineales del amplificador que genera productos de intermodulación, estos productos especialmente el de tercer y quinto orden afectan a la comunicaciones de la banda adyacente, por otro lado están los espurios, el nivel de los espurios es muy bajo en comparación con las emisiones fuera de banda, pudiendo eliminarlo o por lo menos reducir su efecto con filtros a la entrada del receptor GSM-R.

Las emisiones OOB como hemos explicado, se generan dentro de la banda adyacente lo que dificulta su filtrado con filtro paso banda, la diferencia entre el nivel de potencia de la señal deseada y el nivel de dichas emisiones se define con la ACLR.

Las emisiones OOB procedentes de comunicaciones de banda estrecha como es el caso de GSM prácticamente no afectan las comunicaciones GSM-R ya que la ACLR en este caso es muy grande que equivale un nivel de emisión OOB bajo, en cambio estas emisiones perjudican la relación señal-interferencias, C/I, cuando la distancia entre la estación base de la red interferente y la MS GSM-R no es suficientemente grande. Por otra parte las emisiones procedentes de UMTS introducen más nivel de emisiones OOB pero como el ancho de banda de esta comunicación es fijo lo que facilita la prevención ante interferencias de este tipo.

En el caso de las interferencias procedentes de BS LTE el problema es aún más grave debido al ancho de banda adaptativo que dispone LTE, sin embargo cuando se transmite una potencia igual por ambas estaciones base y con una distancia igual entre las BS y el receptor GSM-R no sufre un efecto notable de las interferencias sobre todo cuando el ancho de banda de la señal LTE es de 20 MHZ, ya que en este caso el nivel de potencia se distribuye por todo el ancho de banda lo que mejora la C/I.



CONCLUSIÓN

Al aumentar la separación entre portadoras se consigue reducir el nivel de las emisiones OOB lo que aumenta la ACLR y mejora la BER, en caso de una señal interferente con un ancho de banda de 5 MHz, una separación de 2.8 MHz es suficiente para que ambas comunicaciones puedan co-existir, al aumentar el ancho de banda de la señal interferente lógicamente debemos aumentar la separación entre portadoras siendo una separación entre dos portadoras la mitad de ancho de banda del canal interferente es suficiente siempre que la relación señal interferencias es mayor o igual a 13 dB. En términos de la separación entre los bordes del canal, LTE y GSM-R podrán co-existir sin necesidad de dejar un intervalo de guarda entre las portadoras de ambas comunicaciones, por lo que se puede aprovechar todo el espectro asignado a tal servicio.

En caso de una separación entre canales mayor que la necesaria, por un lado se consigue mejorar la calidad de la comunicación GSM-R, y por otro lado podemos mantener la misma calidad transmitiendo una señal con menor nivel de potencia o llegando a distancias más lejos, en definitiva las interferencias reducen la zona de cobertura de la BS GSM-R, en caso de interferencias fuertes, podría dar el caso de perder la comunicación.

En un caso real la comunicación GSM-R se verá afectada por interferencias procedente de diferentes canales al mismo tiempo, aun así el canal que más afecta a dicha comunicación es el que está más cerca a la portadora de la señal deseada, ya que es la que más intermodulación interpone, en el caso de que las interferencias procedan de una señal de banda estrecha es necesario dejar por lo menos un intervalo de guarda de 100 KHz ya que debido al pequeño ancho de banda de estas emisiones hace que el pico de potencia de las mismas sea mucho más alto que las de comunicaciones de banda ancha para la misma potencia transmitida, lo que reduce la relación señal–interferencias notablemente.

Como hemos verificado con los resultados de las simulaciones realizadas, los filtros no ofrecen una solución aceptable a este problema, como vimos en las simulaciones por un lado los filtros reducen el nivel de los espurios de las emisiones no deseadas, sin embargo no se consigue filtrar las emisiones OOB que se intercalan en la banda de paso de la señal deseada. En definitiva esta solución no es suficiente para reducir el impacto de las interferencias en la red GSM-R, lo que obliga a combinarla con otras soluciones como la coordinación entre operadoras o el control automático de potencia, etc.

La solución más eficaz para la co-existencia entre ambos servicios de telecomunicación es la coordinación entre operadoras, primero se debe acordar el reparto de las estaciones base tanto de la red LTE como la de GSM-R, y la colocación de los transmisores, típicamente se colocan los transmisores LTE en las mismas torres de GSM-R lo que aumentaría los niveles de la intermodulación de



CONCLUSIÓN

LTE que afectaría bastante al enlace ascendente GSM-R. Si esta solución se adopta es necesario liberar el canal adyacente de la red LTE a GSM-R, además habrá que limitar los niveles de potencia que se transmite, **nivel máximo 43 dBm**, este nivel debe ser reducido en zonas rurales con poco tráfico de red LTE y alrededor de las vías del tren donde pueda haber visibilidad directa entre la estación base LTE y el tren, este nivel de potencia debe ser proporcional al nivel que emite la BS GSM-R de manera que la relación ACLR debe ser mayor que 25 dB en condiciones normales e incluso 30 dB en zonas críticas con alto tráfico ferroviario.

Para cumplir los límites de ACLR mencionados, se recomienda activar el control automático de potencia en el enlace descendente GSM-R ajustando la potencia transmitida a las necesidades de la MS que está en la célula de cobertura, de esta manera se podrá dar cobertura a un tren asegurando una ACLR mínima, lo que reduce la probabilidad de llamadas perdidas en la red GSM-R.

Para mejorar la ACLR entre la señal GSM-R y el canal adyacente de la red LTE, se debe mejorar los transmisores LTE, especialmente la etapa amplificadora, utilizando amplificadores con alto IP3 para ampliar la zona lineal del amplificador y como consecuencia de ello se reducirá el nivel de intermodulación que es la causa principal de las emisiones fuera de banda.

La mejora de la sensibilidad de los receptores GSM-R es muy importante para aumentar selectividad del receptor y por lo tanto aumentar la ACS lo que reduce la probabilidad de bloqueo, sin embargo como vimos en *el capítulo 1*, la relación de interferencias del canal adyacente, ACIR, está totalmente dominada por el ACLR lo que hace que el efecto de la ACS apenas se nota. Por lo cual además de mejorar la red GSM-R con transmisores/receptores de alta calidad es necesario que por parte de las redes públicas se tomen las mismas decisiones para no perjudicar las comunicaciones de las bandas adyacentes.

Desde el punto de vista regulador, la CMT (Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones) es la que se encarga de supervisar el cumplimiento de los niveles máximos que transmiten las BS y así los niveles de emisiones no deseadas.



CONCLUSIÓN



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS

- [1] UIT, “Protección de los servicios de seguridad de emisiones no deseadas”; 2001
- [2] ECC, “Compatibility study for LTE and WIMAX operating within the bands 880-915 MHz / 925-960 MHz and 1710 1785 MHz /1805-1880 MHz (900/1800 MHz bands)”, Noviembre 2010
- [3] ECC, “Practical mechanism to improve the compatibility between GSM-R and public mobile networks and guidance on practical coordination”; Mayo 2011
- [4] Comisión Europea; “Normativa Europea 2009/766/EC”; octubre 2009
- [5] ECC, “Compatibility between UMTS 900/1800 and systems operating in adjacent bands”; Marzo 2007
- [6] UIC WG FM; “Report on interferences to GSM-R 2.0”; Mayo 2012
- [7] Andy Barnard; “UMTS900 – GSM-R Interference Measurements”; Junio 2011
- [8] UIC RAIL SYSTEM DEPARTMNT; “Coexistence challenges of LTE-Interference in GSM-R”; octubre 2012
- [9] UIC RAIL SYSTEM DEPARTMNT; “ERTMS/GSM-R Quality of Service Test Specification”; Septiembre 2003
- [10] Sun Jingfei; “Mitigating interference between LTE and 2G/3G networks”; Diciembre 2009
- [11] Olivier ANDRE; “LTE and its applications in Railways”; Noviembre 2010
- [12] Luca Reggiani;” LTE systems-overview”; Diciembre 2009
- [13] Ascom; “LTE technology and terms products”; www.ascom.com Marzo 2009
- [12] Eric Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, Per Beming; “3G EVOLUTION: HSPA AND LTE FOR MOBILE BROADBAND”; 2008
- [14] EUROPEAN COMMISSION; “Communications Networks Content & Technology Directorate-General”; Febrero 2013
- [15] Trafikverket; “Coexistence between GSM-R and 3G / 4G-Systems in the 900 MHz Frequency Band - Swedish View”; Marzo 2013
- [16] ECC; “Compatibility between GSM MCBTS and others services (TRR, RSBN/PRMG, HC-SDMA, GSM-R, DME, MIDS, DECT) operating in the 900 and 1800 MHz frequency bands”; Junio2010



REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍAS

- [17] Anritsu; “ACPR Measurements Using the ME7840A”; Febrero 2001
- [18] R&S; “Measurement of Adjacent Channel Power on Wideband CDMA Signals”; Marzo 1998
- [19] J. Karlsson and J. Heinegard; “Interference Rejection Combining for GSM”; Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, Cambridge, MA, USA, 1996
- [20] R. Knopp and P.A. Humblet, “Information Capacity and Power Control in Single-cell Multi-user Communications”; Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Seattle, WA, USA, Vol. 1, 1995



ACRÓNIMOS



ACRÓNIMOS



3G	Third Generations
3.5G	Evolution of 3G
4G	Fourth Generations
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio
ACPR	Adjacent Channel Power Ratio
ACS	Adjacent Channel Selectivity
BCCH	Broadcast Control CHannel
BER	Bits Error Rate
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CMT	Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones
DFT	Discrete Fourier Transformation
E-GSM-R	Extended-GSM-R
EIRENE	European Integrated Railway Radio Enhanced Network
eNodeB	Evolved Node B
ETCS	European Train Control System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FH-CDMA	Frequency Hopping - CDMA
GSM	Global System for Mobile communications Groupe Spécial Mobile
GSM-R	GSM- Railway
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
LTE	Long Term Evolution
MS	Mobile Station



ACRÓNIMOS

MCL	Minimal Coupling Losses
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
OOB	Out Of Band
PIRE	Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
TDT	Televisión Digital Terrestre
TDW	Time Domain Windowing
UHF	Ultra High Frequency
UIC	international union of railways
UIT	International Telecommunication Union (ITU)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VSS	Visual System simulator



ANEXOS



ANEXOS

DECISIÓN DE LA COMISIÓN

de 16 de octubre de 2009

relativa a la armonización de las bandas de frecuencias de 900 MHz y 1 800 MHz para los sistemas terrenales capaces de prestar servicios paneuropeos de comunicaciones electrónicas en la Comunidad

[notificada con el número C(2009) 7801]

(Texto pertinente a efectos del EEE)

(2009/766/CE)

LA COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS,

Visto el Tratado constitutivo de la Comunidad Europea,

Vista la Decisión nº 676/2002/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de marzo de 2002, sobre un marco regulador de la política del espectro radioeléctrico en la Comunidad Europea (Decisión espectro radioeléctrico)⁽¹⁾, y, en particular, su artículo 4, apartado 3,

Considerando lo siguiente:

(1) Las bandas de frecuencias de 890-915 y 935-960 MHz fueron reservadas y debían ser ocupadas por el servicio paneuropeo de comunicaciones móviles digitales celulares públicas, prestado en cada uno de los Estados miembros con arreglo a una especificación común, definida por la Directiva 87/372/CEE del Consejo, de 25 de junio de 1987, relativa a las bandas de frecuencia a reservar para la introducción coordinada de comunicaciones móviles terrestres digitales celulares públicas paneuropeas en la Comunidad⁽²⁾, y complementada por la Recomendación del Consejo, de 25 de junio de 1987, relativa a la introducción coordinada de comunicaciones móviles terrestres digitales celulares públicas paneuropeas en la Comunidad⁽³⁾ y por la Resolución del Consejo, de 14 de diciembre de 1990, sobre la fase final de la introducción coordinada de comunicaciones móviles terrestres públicas digitales celulares paneuropeas en la Comunidad (GSM)⁽⁴⁾.

(2) La Directiva 2009/114/CE del Parlamento Europeo y del Consejo⁽⁵⁾ modifica la Directiva 87/372/CEE y abre las bandas de frecuencia de 890-915 MHz y 935-960 MHz (la banda de 900 MHz) al Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) y a otros sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas que pueden coexistir con el Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM), de conformidad con las medidas técnicas de aplicación adoptadas con arreglo a la Decisión nº 676/2002/CE (en lo sucesivo, «la Decisión

del espectro radioeléctrico»). Procede, por lo tanto, adoptar medidas técnicas para hacer posible la coexistencia del sistema GSM y de otros sistemas en la banda de 900 MHz.

(3) Las bandas de frecuencias de 1 710-1 785 MHz y 1 805-1 880 MHz (la banda de 1 800 MHz) están disponibles para la explotación del GSM y actualmente son utilizadas por los sistemas GSM en Europa. La banda de 1 800 MHz debe abrirse también, en las mismas condiciones que la banda de 900 MHz, a otros sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas que pueden coexistir con los sistemas GSM.

(4) Debe protegerse el uso actual del GSM en la banda de 1 800 MHz en toda la Comunidad mientras exista una demanda razonable de este servicio, de acuerdo con el planteamiento adoptado para proteger el uso del GSM en la banda de 900 MHz mediante la Directiva 87/372/CEE.

(5) Con arreglo al artículo 4, apartado 2, de la Decisión del espectro radioeléctrico, el 5 de julio de 2006 la Comisión confirió un mandato a la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (en lo sucesivo, «la CEPT») a fin de que elaborara unas condiciones técnicas mínimamente restrictivas para las bandas de frecuencias abordadas en el contexto del WAPECS (Wireless Access Policy for Electronic Communications Services), entre las que figuran las de 900 MHz y 1 800 MHz.

(6) La neutralidad con respecto a la tecnología y la neutralidad con respecto al servicio son objetivos políticos respaldados por los Estados miembros en el dictamen del Grupo de Política del Espectro Radioeléctrico (en adelante, «el RSPG») sobre el WAPECS de 23 de noviembre de 2005, a fin de propiciar un uso más flexible del espectro. El dictamen del RSPG sobre el WAPECS considera que estos objetivos políticos deben introducirse gradual, no repentinamente, para así no perturbar el mercado. La Comisión ha expuesto su opinión sobre un uso más flexible del espectro en su Comunicación sobre «un acceso rápido al espectro para los servicios de comunicaciones electrónicas inalámbricas a través de una mayor flexibilidad»⁽⁶⁾, subrayando, entre otras cosas, la necesidad de encontrar una solución coherente y proporcionada para las bandas de los móviles de segunda y tercera generación en el contexto de la flexibilización del uso del espectro por los servicios de comunicaciones electrónicas.

⁽¹⁾ DO L 108 de 24.4.2002, p. 1.⁽²⁾ DO L 196 de 17.7.1987, p. 85.⁽³⁾ DO L 196 de 17.7.1987, p. 81.⁽⁴⁾ DO C 329 de 31.12.1990, p. 25.⁽⁵⁾ Véase la página 25 del presente Diario Oficial.⁽⁶⁾ COM(2007) 50.

- (7) Por lo tanto, de acuerdo con el planteamiento adoptado para la apertura de la banda de 900 MHz mediante la Directiva 87/372/CEE, la banda de 1 800 MHz usada actualmente para el GSM debe designarse también para este y para otros sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas que pueden coexistir con los sistemas GSM, y los Estados miembros deben adoptar todas las medidas necesarias para proteger de interferencias perjudiciales la explotación continuada de los sistemas GSM.
- (8) Cualquier otro sistema desplegado en las bandas de 900 MHz y 1 800 MHz debe garantizar la compatibilidad técnica con las redes adyacentes explotadas por otros titulares de derechos en estas bandas, así como con el uso de bandas de frecuencias adyacentes a las bandas de 900 y 1 800 MHz.
- (9) En el caso de las medidas de armonización con arreglo a la Decisión del espectro radioeléctrico, la compatibilidad técnica se demuestra mediante los estudios de compatibilidad realizados por la CEPT a través de un mandato de la Comisión. Estos estudios deben ayudar a definir las condiciones técnicas necesarias que garanticen la coexistencia del creciente número de sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas. Debe confeccionarse una lista de los sistemas que demuestren esa compatibilidad técnica, lista que la Comisión, asistida por el Comité del espectro radioeléctrico con arreglo a los principios del WAPECS, modificaría cuando procediera, y de este modo aumentaría con el tiempo el número de sistemas con acceso armonizado a las bandas de 900 y 1 800 MHz.
- (10) Basándose en estudios técnicos, en particular los informes 82 y 96 del Comité de comunicaciones electrónicas (ECC) de la CEPT, y en la respuesta al mandato de 5 de julio de 2006 incluido en el informe 19 de la CEPT, esta ha llegado a la conclusión de que pueden desplegarse redes UMTS/900/1 800 en zonas urbanas, suburbanas y rurales en coexistencia con las redes GSM900/1 800 utilizando unos valores adecuados de separación entre portadoras.
- (11) Los resultados del mandato a la CEPT deben hacerse aplicables en la Comunidad y los Estados miembros deben aplicarlos sin demora, dado que el mercado demanda la introducción del UMTS en estas bandas. Además, los Estados miembros deben garantizar que el UMTS proteja adecuadamente los sistemas existentes en las bandas adyacentes.
- (12) A fin de incrementar la flexibilidad al tiempo que se preserva la necesaria cobertura paneuropea de los servicios de comunicaciones electrónicas en las bandas armonizadas, los Estados miembros deben tener además la posibilidad de permitir la introducción en las bandas de 900 y 1 800 MHz de otros sistemas junto con el GSM y otros sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas identificados, siempre que garanticen la coexistencia de tales sistemas terrenales.
- (13) La gestión técnica del espectro radioeléctrico incluye la armonización y atribución del espectro radioeléctrico. Esta armonización debe reflejar los requisitos de los principios de política general definidos a nivel comunitario. Sin embargo, la gestión técnica del espectro radioeléctrico no incluye los procedimientos de asignación y autorización (ni su calendario), ni tampoco la decisión de usar o no procedimientos de selección competitiva para la asignación de radiofrecuencias.
- (14) Las diferencias en las situaciones nacionales actuales podrían ocasionar falseamientos de la competencia. El actual marco regulador pone en manos de los Estados miembros los instrumentos necesarios para afrontar estos problemas de manera proporcionada, no discriminatoria y objetiva, en el respeto del Derecho comunitario y, en particular, de la Directiva 87/372/CEE, de la Directiva 2002/20/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de marzo de 2002, relativa a la autorización de redes y servicios de comunicaciones electrónicas (Directiva autorización) ⁽¹⁾ y de la Directiva 2002/21/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de marzo de 2002, relativa a un marco regulador común de las redes y los servicios de comunicaciones electrónicas (Directiva marco) ⁽²⁾.
- (15) El uso del espectro está sujeto a los requisitos establecidos en el Derecho comunitario sobre protección de la salud pública, y, en particular, la Directiva 2004/40/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (campos electromagnéticos) (decimoctava Directiva específica con arreglo al apartado 1 del artículo 16 de la Directiva 89/391/CEE) ⁽³⁾ y la Recomendación 1999/519/CE del Consejo, de 12 de julio de 1999, relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (0 Hz a 300 GHz) ⁽⁴⁾. La protección de la salud en el caso de los equipos radioeléctricos queda garantizada por su cumplimiento de los requisitos esenciales de la Directiva 1999/5/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 1999, sobre equipos radioeléctricos y equipos terminales de telecomunicación y reconocimiento mutuo de su conformidad ⁽⁵⁾.
- (16) Para garantizar un uso efectivo de las bandas de 900 MHz y 1 800 MHz también a plazo más largo, las administraciones deben seguir realizando estudios para contribuir a acrecentar la eficiencia y el uso innovador. Con miras a incluir ulteriormente en la presente Decisión otras tecnologías, estos y otros estudios emprendidos por la CEPT sobre la base de nuevos mandatos podrían demostrar que sistemas distintos del GSM y el UMTS son capaces de prestar servicios terrenales de comunicaciones electrónicas con una cobertura paneuropea y garantizar la compatibilidad técnica con el GSM y el UMTS a través de medios apropiados.

⁽¹⁾ DO L 108 de 24.4.2002, p. 21.

⁽²⁾ DO L 108 de 24.4.2002, p. 33.

⁽³⁾ DO L 159 de 30.4.2004, p. 1.

⁽⁴⁾ DO L 199 de 30.7.1999, p. 59.

⁽⁵⁾ DO L 91 de 7.4.1999, p. 10.

- (17) Las medidas previstas en la presente Decisión se ajustan al dictamen del Comité del espectro radioeléctrico.

HA ADOPTADO LA PRESENTE DECISIÓN:

Artículo 1

La presente Decisión se propone armonizar las condiciones técnicas de disponibilidad y uso eficiente de la banda de 900 MHz, con arreglo a la Directiva 87/372/CEE, y de la banda de 1 800 MHz para sistemas terrestres capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas.

Artículo 2

A efectos de la presente Decisión, se entenderá por:

- a) «sistema GSM», una red de comunicaciones electrónicas que se ajusta a las normas sobre el GSM publicadas por el ETSI, en particular la EN 301 502 y la EN 301 511;
- b) «banda de 900 MHz», las bandas de 880-915 MHz y 925-960 MHz;
- c) «banda de 1 800 MHz», las bandas de 1 710-1 785 MHz y 1 805-1 880 MHz.

Artículo 3

Los sistemas terrestres capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas que pueden coexistir con los sistemas GSM en la banda de 900 MHz, en la acepción del artículo 1, apartado 1, de la Directiva 87/372/CEE figuran en el anexo. Estos sistemas estarán sujetos a las condiciones y a los plazos de aplicación en él expuestos.

Artículo 4

1. La banda de 1 800 MHz será designada para los sistemas GSM y puesta a su disposición a más tardar el 9 de noviembre de 2009.

2. La banda de 1 800 MHz será designada y se pondrá a disposición de los demás sistemas terrestres capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas que figuran en el anexo, en las condiciones y dentro de los plazos de aplicación en él expuestos.

Artículo 5

1. Los Estados miembros podrán designar y poner a disposición las bandas de 900 MHz y 1 800 MHz para otros sistemas terrestres que no figuren en el anexo, siempre que garanticen que tales sistemas:

- a) pueden coexistir con los sistemas GSM;
- b) pueden coexistir con otros sistemas que figuran en el anexo, en su propio territorio y en los Estados miembros vecinos.

2. Los Estados miembros velarán por que los otros sistemas a que se refieren el artículo 3, el artículo 4, apartado 2, y el apartado 1 del presente artículo den la protección adecuada a los sistemas que operan en bandas adyacentes.

Artículo 6

Los Estados miembros seguirán vigilando las bandas de 900 y 1 800 MHz para garantizar su uso eficiente y, en particular, informarán a la Comisión sobre la eventual necesidad de revisar el anexo.

Artículo 7

Los destinatarios de la presente Decisión serán los Estados miembros.

Hecho en Bruselas, el 16 de octubre de 2009.

Por la Comisión

Viviane REDING

Miembro de la Comisión

ANEXO

LISTA DE LOS SISTEMAS TERRENALES A QUE SE REFIEREN EL ARTÍCULO 3 Y EL ARTÍCULO 4, APARTADO 2

Los siguientes parámetros técnicos deberán aplicarse como componente esencial de las condiciones necesarias para garantizar la coexistencia en ausencia de acuerdos bilaterales o multilaterales entre redes vecinas, sin que ello sea óbice para que los operadores de tales redes acuerden parámetros técnicos menos estrictos.

Sistemas	Parámetros técnicos	Plazos de aplicación
UMTS que se ajuste a las normas UMTS publicadas por el ETSI, en particular, EN 301 908-1, EN 301 908-2, EN 301 908-3 y EN 301 908-11	1. Separación entre portadoras de 5 MHz o más entre dos redes UMTS vecinas. 2. Separación entre portadoras de 2,8 MHz o más entre una red UMTS y una red GSM vecinas	9 de mayo de 2010

ADJACENT CHANNEL INTERFERENCE

Impact on the Capacity of WCDMA/FDD Networks

Daniel Figueiredo, Pedro Matos, Nuno Cota, António Rodrigues

Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, Lisbon, Portugal

Email: danif@netcabo.pt, pygmatos@hotmail.com, ncota@isel.ipl.pt, antonio.rodrigues@lx.it.pt

Keywords: WCDMA, adjacent channel interference (ACI), FDD, spectrum management

Abstract: The adjacent channel interference (ACI) can result in a reduced network capacity in a multioperator WCDMA/FDD environment. This paper is devoted to the study of the ACI, using a static simulator. Simulations were performed in order to identify particular scenarios and network compositions where ACI plays a major role in the system capacity. On the basis of the results, the authors identify the best strategy for frequency deployment within the available spectrum. It is demonstrated that the macro carrier should be located in the centre of the frequency band, protected from the ACI introduced by other operators. It is, in fact, the carrier which suffers the greatest losses caused by the increase in ACI. Furthermore, the micro carrier should be placed as close as possible to the adjacent channel of other operators in order to maximize system capacity.

1 INTRODUCTION

At the moment radio spectrum is becoming increasingly more occupied, making its management a vital tool to network planning. It is under these circumstances that the third generation (3G) mobile communications systems emerged, and in particular the UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) in Europe. The air interface chosen for the 3G UMTS system was WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) for the paired bands FDD (Frequency Division Duplex). The scope of this paper is to study the impact of frequency utilization on WCDMA/FDD networks and develop a strategy to optimise it.

The performance of any CDMA system is conditioned by the interference. From the various possible sources of interference that are present in these systems this paper focuses on the study of adjacent channel interference (ACI) and its effect on the overall capacity of the system.

This study consists of five main sections. Following a brief overview of a few features of UMTS related with the options chosen for the simulations, to be found in Section 2, the criteria for

the choice of the tested scenarios are explained in Section 3. Section 4 presents the results obtained with the simulated scenarios, and final conclusions are drawn in Section 5.

2 INTERFERENCE ISSUES IN UMTS/FDD NETWORKS

When defining the UMTS system, 3GPP (3rd Generation Partnership Project) inferred that each radio channel has a bandwidth of 5 MHz and the channels allocated are positioned beside each other in uplink and downlink bands separated by 190 MHz [3]. Each channel has its carrier and these are assigned to the UMTS operators in the market.

The strategy designed to reduce the interference, thus achieving the highest possible capacity, consists in identifying optimal spacing between carriers in the radio spectrum available for use. For this purpose, a specific frequency arrangement must be considered, as it may vary from country to country.

The initial licensed spectrum for UMTS in FDD mode was a band with twelve carriers, both uplink and downlink. The case considered includes

four operators, each of which has been allocated three carriers. Within the allocated band, it is possible to choose the spacing between its carriers and the distance from adjacent operator carriers. 3GPP defines for the spacing between channels a raster of 200 kHz [4], which means that the spacing between carriers can vary in increments of 200 kHz around 5 MHz.

As seen in Figure 1, in order to decide which spacing should be used, more issues must be taken into account, to prevent the carriers from encroaching on their neighbours. Consequently, bearing in mind the limits typically used in simulations, it has been chosen to vary the distances between the values 4.6 and 5.2 MHz.

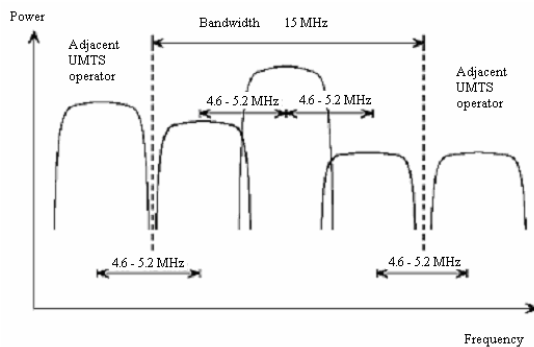


Figure 1: Spacing between carriers in a UMTS system (adapted from [2])

In a WCDMA system, developed in the above context, the interference can stem from a large number of sources, namely, thermal noise, traffic in the same cell, traffic in adjacent cells and traffic from operators using adjacent cells.

Possible ways of measuring the interference leakage between connections operating on different carriers must be considered. As the filter is not perfect, when transmitting in its own channel, one carrier will send part of its power into adjacent channels. This effect is measured as the ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio). On the other hand, the receiver filter is unable to receive only the desired signal alone, which is why the rejection of the adjacent channel signal is measured as ACS (Adjacent Channel Selectivity). Moreover, when considering the existence of two carriers which interfering with each other, the total interference is given as an ACIR (Adjacent Channel Interference Ratio) and determined by (1).

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (1)$$

Furthermore, this source of interference can be seen both from the uplink and from the downlink standpoint. Consider an uplink connection, whose ACIR is given in (2) below. As it is quite likely that the filter in the user equipment (UE) will be poorer than the filter in the base station (BS), the UE ACLR dominates in the case of uplink. In downlink, the situation is analogous, as seen in (3), where the UE ACS dominating on this occasion.

$$ACIR_{UL} = \frac{1}{\frac{1}{ACLR_{UE}} + \frac{1}{ACS_{BS}}} \quad (2)$$

$$ACIR_{DL} = \frac{1}{\frac{1}{ACLR_{BS}} + \frac{1}{ACS_{UE}}} \quad (3)$$

One of the essential parameters used in the simulation was that the value of the filter depends on the spacing given to the channels. 3GPP defines the filter's mask, while identifying minimum values for filters at 5 and 10 MHz [3, 4]. However, in this project more realistic values were used, which correspond to real equipment presently available. These values may be found in Table 1.

Table 1: Values of the filters used in BS and UE

Spacing (MHz)	ACLR (dB)		ACS (dB)	
	UE	BS	UE	BS
5	33	60	33	70
10	43	65	43	

When simulations were run using spacing different from 5 or 10 MHz, e.g. 4.6 MHz, a logarithmic regression is made to convert the filter value and obtain a valid method to compare the results.

3 SIMULATION SCENARIOS

The choice of which scenarios to study was not as simple as it might be assumed at first glance. One of the goals in this paper was to find scenarios where ACI has a major role on the network's capacity, in order to understand the impact of placing carriers with different spacing. In [5], the authors give an idea of the issues to be born in mind when choosing which scenarios to simulate.

In a preliminary stage, the search started with the study of the representative scenarios of rural and urban environments. When simulating two operators, BSs working with adjacent carriers were uniformly distributed over a map. In order to simulate a worst case situation, the sites of both operators are not co-located and the interoperator spatial offset is equal to the cell radius [6].

It was found that the inter-frequency interference impact on the capacity was minimal, when compared with the intra-frequency interference. The reason for this result lies in the fact that there are too many BSs from the same carrier interfering with each other.

The next step taken was to identify scenarios where the ACI played a significant role, at least as important as the interference coming from the connections working on the same carrier. Following simple scenarios, where just a few BSs and two carriers were taken into account, the analysis developed to encompass broader environments simulating urban centres with many antenna sites and three carriers.

A simple map was used as an entrance parameter to the simulator, with no additional information, apart from UE and BS positions. When placing the BSs of two different carriers, one must decide whether they are co-located, i.e. both cells lie on the same site, or not. In the latter situation, it is assumed that the worst case for ACI happens, i.e. the adjacent channel site is located at the coverage edge of the first channel cell.

The simulator used to achieve this analysis was static, using a Monte-Carlo evaluation method. As a result, the users were placed randomly on the map. Following the iterative process, only the connections with sufficient Eb/No (or signal to noise ratio - SNR) for the appointed service were considered to be served by the system. This simulator was adapted from the previous one described in [1] and [7]. By examining many static situations, referred to as snapshots, network capacity is estimated through the average number of the served users [8].

The bit rates tested in this study were chosen in accordance with the services expected to be offered by operators in the first implementation phase. In this case, 12.2 kbps with CS (Circuit Switching), 64 kbps with CS and, finally, 128 kbps in downlink and 64 kbps in uplink using PS (Packet Switching). The results are presented taking into account users accessing one of these three types of services.

The UE power classes considered for determining the maximum output power were class 3 (24 dBm) for voice and class 4 (21 dBm) for data services [3]. The BS maximum output power used was 43 dBm.

Two types of antennas were chosen to simulate macro and micro BS: for the macro BS, tri-sectorized antennas with 18 dBi of gain, and for the micro BS, omni-directional antennas with 4 dBi of gain.

Two different propagation models were considered to calculate the path loss according to the characteristics of the environment (both for outdoor propagation). For rural scenarios the COST 231 Hata model was used. The main input parameters for the model are the UE antenna heights, 1.5 m, and BS antenna heights, 35 m. For the urban environment the propagation model applied was COST 231 Walfish-Ikegami. The main parameters used are UE antenna heights, 1.5 m, BS antenna heights, between 10 and 25 m (depending if they are macro or micro), street width, 20 m, building separation, 40 m, and building height, 12 m.

4 RESULTS

In the extended study that originated this paper, a wide range of scenarios and environments were considered [9]. Urban, rural and motorway environment were tested using layers containing twenty-three macro cells placed in the form of a grid. Furthermore, eight scenarios with only a few antennas (five at the most) were run to simulate specific situations using macro and micro cells. The dense urban environment was simulated, by using macro cells layers and micro cells to cover identified hotspots. In this paper, only the three most significant tests will be presented.

At the end of each simulation, the outputs were analysed. Apart from the maps indicating the BS and UE position, the network's capacity (measured in average number of served users) and the capacity loss (when compared with no ACI), parameters like the ratio between sources of interference were also analysed in [9]. The interference sources considered in the results included the interference coming from the adjacent channel, the interference from the same channel from neighbouring cells and the interference from the same cell (due to the other users connected to the same BS).

A maximum load of 50 % was allowed in the radio interface.

4.1 Case 1: Small scale networks with two operators

This scenario was developed to study the impact of a new micro BS placed by an operator to cover a

hotspot in the middle of an existing network of macro BSs from the adjacent carrier competitor. The users from both operators have been located around the centre of the area considered. The area simulated has a high density of active clients, as shown in Figure 2.

The number of users presented in Figure 2 corresponds to the initial users from each operator, and are placed on the map at the simulation start.

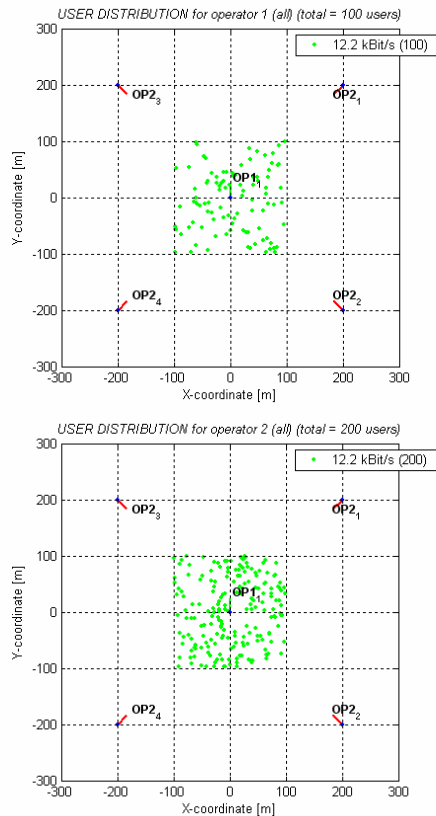


Figure 2: Location of UE (CS 12.2) and BS (Case 1)

Table 2 shows the average number of users served employing different channel spacing and the percentage of loss compared to the case where no adjacent operator exists (without ACI) for the CS 12.2 kbps service.

It has been verified that the operator 2, covering the area with four macro BSs, is the one that suffers most from interference. This may be explained by the fact that users of operator 1 (micro BS) are closer to the antenna, which therefore makes it more difficult for them to lose the connection. A comparison of the results obtained from the simulations performed with the three services tested for operator 2, is shown in the graph presented in Figure 3.

Table 2: Results from the simulated scenario (Case 1)

CS 12.2 kbps	Capacity (average number of users)	Capacity Loss (%)
Operator 1		
Without ACI	77	0
4.6 MHz	76.1	1.17
4.8 MHz	75.8	1.56
5.0 MHz	76.7	0.39
5.2 MHz	76.7	0.39
10.0 MHz	77	0
Operator 2		
Without ACI	162.1	0
4.6 MHz	44.8	72.36
4.8 MHz	104.7	35.41
5.0 MHz	126.2	22.15
5.2 MHz	134.6	16.96
10.0 MHz	155.5	4.07

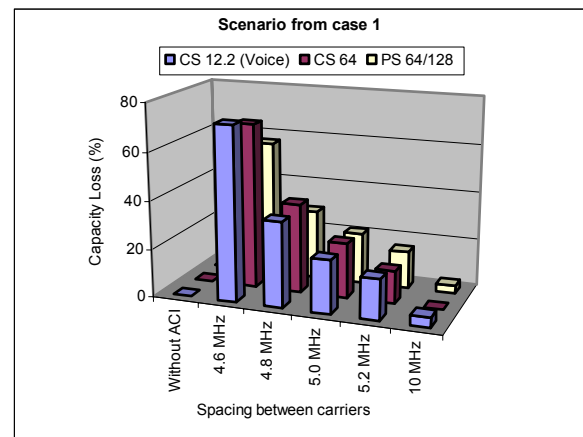


Figure 3: Capacity Loss of operator 2 (Case 1)

4.2 Case 2: One layer macro and two layers micro

In the situation shown in Figure 5 several macro BSs were placed to form a grid and cover the area to serve users of operator 1. Four hotspot areas (with higher user density) from both operators 1 and 2 were placed and micro BSs located to cover them.

In this case, it has been tested an environment where three carriers coexist and interfere with each other. Operator 1 has one carrier for macro BSs (f1) and another for micro BSs (f2). Operator 2 has only one carrier for micro BSs (f3). The three channels were allocated next to each other in the radio spectrum as shown in Table 3.

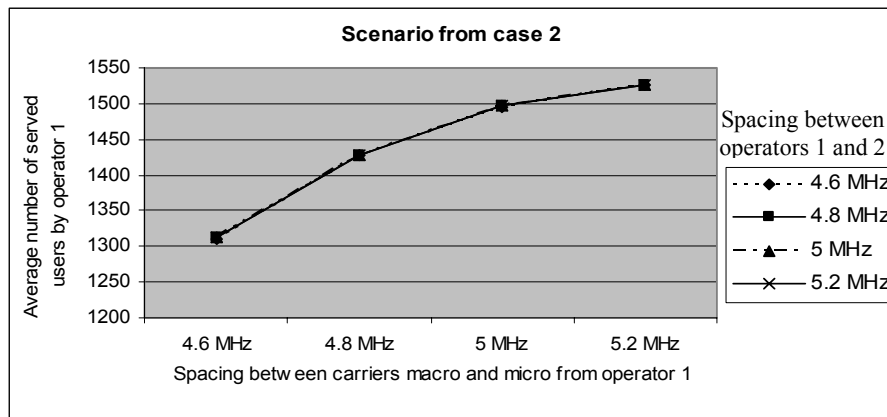


Figure 4: Capacity of operator 1 (Case 2)

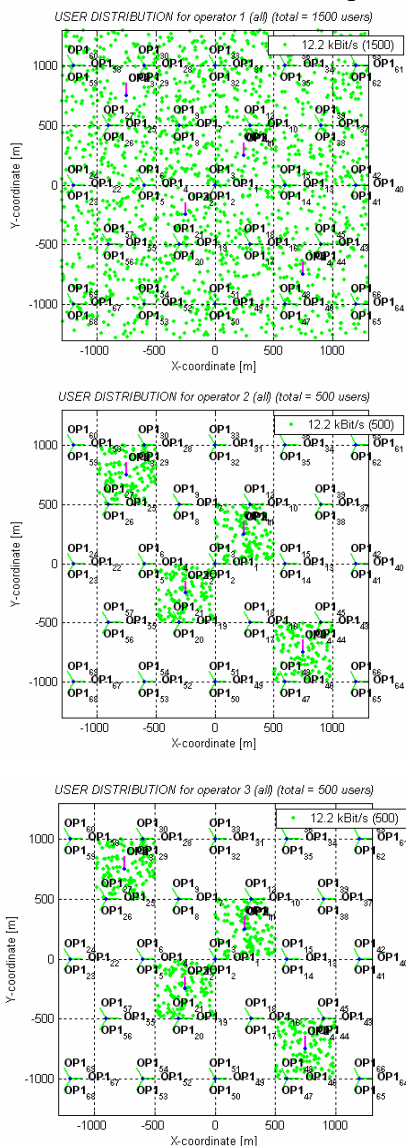


Figure 5: Location of UE (CS 12.2) and BS (Case 2)

Table 3: Frequency planning with macro (M) and micro (m) networks (Case 2)

Operator 1		Operator 2
f1 (M)	f2 (m)	f3 (m)

Once again the spacing considered between each of the three channels varied within the range 4.6 to 5.2 MHz.

The results obtained from these simulations are given in Figure 4. The graph shows the average number of users served by operator 1, and take into account both the users connected to the macro (f1) and to the micro (f2) layers. As expected, it can be seen that the network capacity rises when the spacing between f1 and f2 widens. As both micro layers accommodate fewer users than the macro layer from operator 1, it is evident that the distance between micro layers (f2 and f3) from the different operators does not have a great impact on the capacity of operator 1. This fact is confirmed by the graph, since the lines are almost overlapped.

Following the analysis of these results, it is logically preferable to choose a wider spacing between carriers f1 and f2, in order to achieve an increase in the capacity of operator 1. At the same time, it is reasonable to leave the lowest distance to the carrier from operator 2 (f3), since the damage is imperceptible, towards optimisation of the spectrum allocated.

4.3 Case 3: Two layers macro and one layer micro

As in the previous case, in Case 3, the authors tested the impact of interference among three carriers controlled by two operators. However, in this case, there are two major macro BSs grids from operators 1 and 2. The same hotspots mentioned in

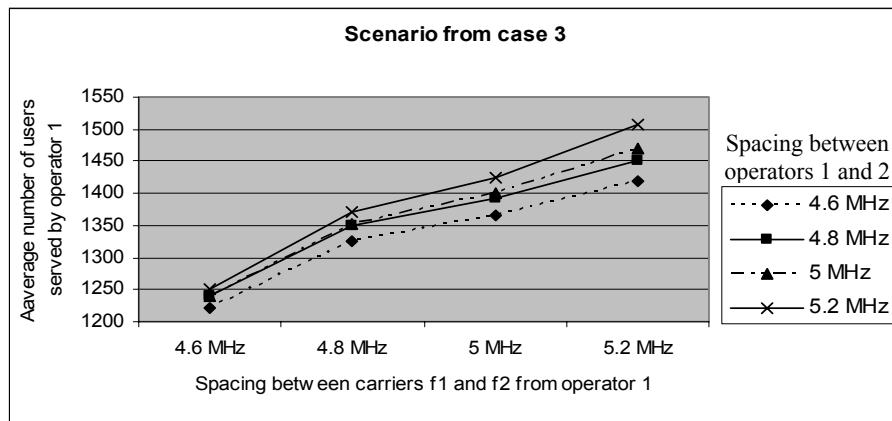


Figure 6: Capacity of operator 1 (Case 3)

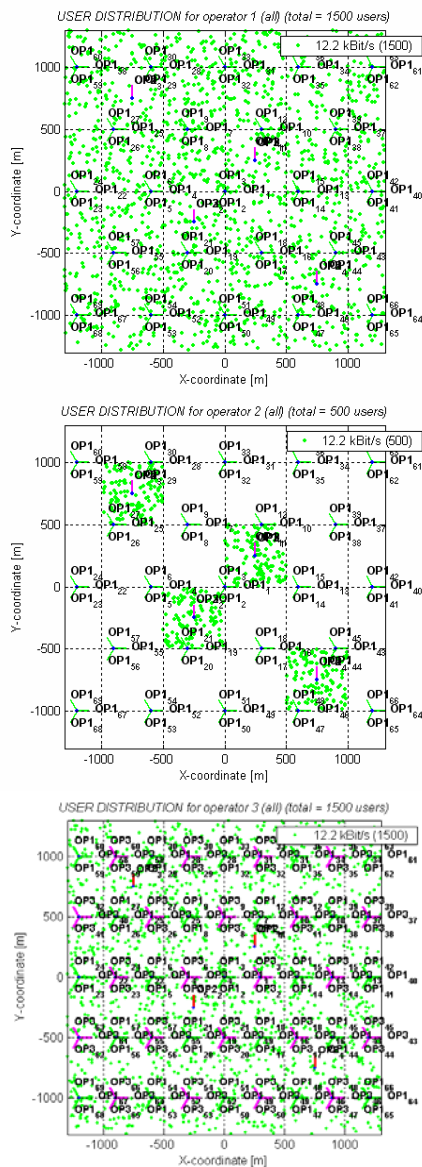


Figure 7: Location of UE (CS 12.2) and BS (Case 3)

Case 2 are now covered with micro BSs by operator 1 only, as seen in Figure 7. Thus, the configuration of the radio spectrum is similar, the only difference being that there are two channels for macro BSs and one for micro BSs, as shown in Table 4.

Table 4: Frequency planning with macro (M) and micro (m) networks (Case 3)

Operator 1		Operator 2
f1 (M)	f2 (m)	f3 (M)

The results, presented in the graph from Figure 6, were obtained by using the same procedure followed in Case 2.

As before, the network's capacity grows as the distance between f1 and f2 becomes larger. However, it can now be confirmed that the spacing between the two adjacent carriers from different operators (f2 and f3) has a significant impact on the overall capacity of operator 1. This feature is due to the fact that carrier f3, from operator 2, now accommodates a much larger number of users in its macro layer.

In this situation the analysis has to be considered more carefully than in the previous case. To achieve maximum capacity in operator 1, apparently the best solution would be to choose the maximum spacing between carriers f1 and f2 whilst, at the same time, also leaving the highest distance to the adjacent operator channel (f3). However, in doing so, one is failing to take into account the fact that each operator has three allocated channels. Note that, in the future, it will be valuable to use all of them to face an anticipated traffic increase. As a result, it would wise to choose a configuration in which the two carriers from operator 1 are not positioned in such a way that they occupy the free space left by hitherto unused third channel.

5 CONCLUSIONS

In this paper the authors studied the impact of the ACI on a general network's capacity. This led to some more useful conclusions that may be applied when planning the launch of a WCDMA/FDD radio networks.

When considering two wide BSs grids that lie close to each other to cover a specific area, it was observed that the main interference source is not the ACI, but interference from the neighbouring BSs, working on the same channel.

From scenarios like the one presented in Case 1, it was noted that the macro BSs are more likely to suffer from ACI when new hotspots are covered with micro BS by a competitor operator. This fact is explained by the longer distance between the user and the macro BS, as compared with the latter. As the macro carrier may suffer a greater impact on capacity, it should be protected and placed in the centre channel of the allocated spectrum. This choice is irrespective of the number or type of carriers used, assuming that the operator launching a service uses at least one macro carrier.

It may also be seen, from these small and specific case scenarios like Case 1, that the use of a 4.6 MHz spacing may cause critical problems, leading to a serious reduction in the network's capacity. Therefore, distances between carriers of 4.6 MHz or less should never be used. Although in the vast majority of the situations the loss may not be that disastrous, the possibility of having certain areas with losses above 50 % is unsustainable to an operator.

Upon considering an available spectrum of three carriers, and assuming that the macro carrier is located in the centre channel, it is intended to decide where to place the micro channel. From Case 2, where operator 2 placed a micro carrier in the channel adjacent to the spectrum of operator 1, it was seen that the distance between the two channels was almost irrelevant to the overall network's capacity. However, when operator 2 has a macro carrier on the channel, adjacent to operator 1, the latter suffers the consequences of a reduction in the distance between different operators' channels. On the basis of the compromise solution of not occupying the spectrum of the three channels allocated using two carriers only, it may be concluded that a spacing of 5.2 MHz between f1

and f2 and 4.8 MHz between f2 and f3 is the best option.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Luís Santo and Ana Claro for their support and useful discussions that helped to improve this work. The authors are also grateful to *Optimus* for the support given to this project.

REFERENCES

- [1] Laiho, J., Wacker, A., and Novosad, T., 2002, *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, John Wiley & Sons, Sussex, England
- [2] Holma, H., and Toskala, A., 2002, *WCDMA for UMTS – 2nd Edition*, John Wiley & Sons, Sussex, England
- [3] 3GPP Technical Specification 25.101 v5.5.0, UE Radio Transmission and Reception (FDD)
- [4] 3GPP Technical Specification 25.104 v5.5.0, BS Radio Transmission and Reception (FDD)
- [5] 3GPP Technical Specification 25.942 v5.1.0, Radio Frequency (RF) System Scenarios
- [6] Hiltunen, K., 2002, *Interference in WCDMA Multi-Operator Environments*, Postgraduate Course in Radio Communications 2002-2003, Helsinki University of Technology, Finland
- [7] Wacker, A., Laiho, J., Sipilä, K., Heiska, K., and Heikkinen, 2001, K., *NPSW – MatLab Implementation of a Static Radio Network Planning Tool for Wideband CDMA*
- [8] Povey, G., Gatzoulis, L., Stewart, L., and Band, I., 2003, *WCDMA Inter-operator Interference and "Dead Zones"*, Elektrobis (UK) Ltd, University of Edinburgh
- [9] Figueiredo, D., and Matos, P., 2003, *Analysis, Impact and Strategy of Frequency Utilisation on WCDMA/FDD Networks* (in Portuguese), Final Graduation Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal